



# **AURINKOSÄHKÖ OSANA HYBRIDISÄHKÖNTUOTANTOJÄRJESTELMÄÄ**

Elis Keskinen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2015  
Talotekniikan koulutusohjelma  
Sähköinen talotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan koulutusohjelma  
Sähköinen talotekniikka

KESKINEN, ELIS

Aurinkosähkö osana hybridisähköntuotantojärjestelmä

Opinnäytetyö 43 sivua  
Toukokuu 2015

---

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli parantaa edellytyksiä verkon ulkopuolisten Telecom-mastojen hybridi -sähköntuotantojärjestelmien toteuttamiseksi. Työssä mitoitettiin, paljonko Telecom-mastot tarvitsevat energiaa toimiakseen itsenäisenä ja omavaraisena sähköntuotantolaitteistona. Lisäksi työssä selvitettiin, miten erilaiset olosuhteet vaikuttavat maston laitteiden energiantarpeisiin, sekä otettiin huomioon niiden energiantuotantojärjestelmille aiheuttamat haasteet. Työssä selvitettiin myös, mitä asioita ja tilatietoja järjestelmästä tulisi saada ja miten niitä voisi hallinnoida etäyhteyden avulla. Lisäksi tarkasteltiin, minkälaisia Telecom-mastojen kriittisten toimintojen vika- ja huoltohäilyksiä tarvitaan mastojen häiriöttömän toiminnan takaamiseksi. Työssä kerrotaan yleisesti aurinkovoiman perusteista sekä nykyisistä Finnwind Oy:n tuotteiden soveltuvuudesta hybridi-järjestelmään. Hybridijärjestelmän tuulen tuottama uusiutuva energia on esitelty Jukka Kankaan opinnäytetyössä Pientuulivoima osana hybridisähköntuotantojärjestelmää.

Sähköntuotantoon tarkoitettu hybridijärjestelmä mahdollistaa Telecom-mastojen verkon ulkopuolisen toiminnan uusiutuvien energialähteiden avulla nykyisen dieselgeneraattorin sijaan. Hybridijärjestelmä on toteutettu aurinko- ja tuulivoimalla ja toiminnan takavalla varavoimajärjestelmällä. Se mitoitettiin ja suunniteltiin Afrikkaan päiväntasaajalle. Selvityksen ja laskelmien perusteella hybridijärjestelmä on varteen otettava vaihtoehto verkon ulkopuolisille Telecom-mastoille.

---

uusiutuva energia, hybridijärjestelmä, aurinkosähkö, pientuulivoima, tietoliikennemasto.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services Engineering  
Electrical Building Services

KESKINEN, ELIS  
Solar Power Part Of Hybrid Power Generator System

Bachelor's thesis 43 pages  
May 2015

---

The purpose of this thesis is to improve conditions for execution of hybrid electricity production systems of Telecom-masts outside the power grid. In this paper is examined the energy need for the devices of Telecom-masts to design self-sufficient and independent electricity production hardware, and on the other hand how the different circumstances affect the energy need of the masts considering what kinds of challenges they cause for the energy production systems. In this paper is also researched which facts and statistics should be got and managed with remote access and what sorts of error and maintenance alarms are needed to guarantee undisturbed activity of the crucial functions of Telecom-masts. In this paper is shortly told about the basics of solar power in general and about the suitability of the current products of Finnwind Oy to the hybrid system.

Hybrid electricity production systems enable the functioning of Telecom-masts outside the power grid by means of renewable energy sources instead of the current diesel generator. Hybrid system is carried out with solar and wind power and with backup power system ensuring the functioning.

---

renewable energy, hybridsystem, solar energy, micro-wind turbine, telecommunication mast.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	HYBRIDIJÄRJESTELMÄ-HANKE .....	6
2.1	Telecom- masto .....	7
2.2	Telecom-maston laitteet ja energiankulutus .....	7
3	AURINKOSÄHKÖ .....	9
3.1	Yleisesti .....	9
3.2	Toimintaperiaate .....	10
3.3	Aurinkosähköjärjestelmä .....	11
3.3.1	Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä .....	12
3.3.2	Akkuja lataava aurinkosähköjärjestelmä .....	12
3.3.3	Aurinkoenergian potentiaali kohdemaissa .....	13
4	HYBRIDIJÄRJESTELMÄN LAITTEISTO .....	18
5	HYBRIDIJÄRJESTELMÄN MITOITUS .....	21
5.1	Akkukapasiteetin tarve .....	21
5.2	Varavoima .....	28
5.3	Mitoitettu voimala – Nairobi .....	29
5.4	Etävalvontajärjestelmä .....	33
5.5	Huolto ja ylläpito .....	36
5.6	Kustannukset .....	36
5.7	Elinkaarikustannukset ja takaisinmaksuaika .....	37
6	LOPPUPÄÄTELMÄT .....	40
7	LÄHTEET .....	42

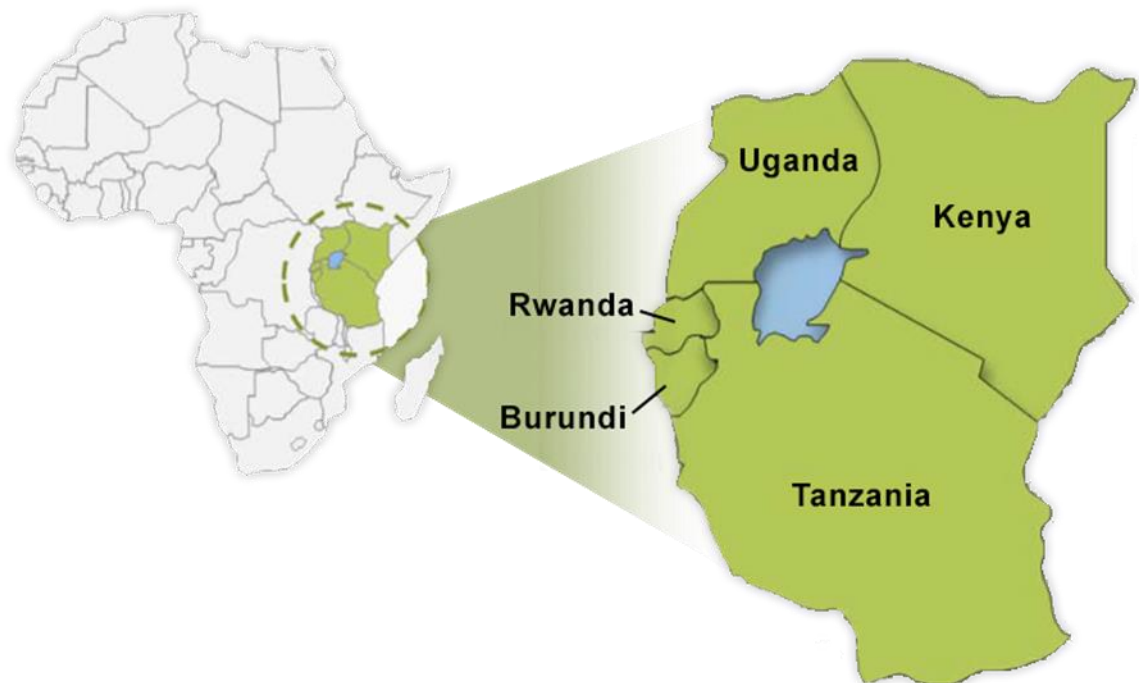
## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää aurinkoenergian potentiaali sähköverkon ulkopuolisten Telecom-mastojen hybridijärjestelmän kolmanneksi energianlähteeksi. Hybridijärjestelmä-hankkeen selvitystyö on tehty Finnwind Oy:n toimeksiantona verkon ulkopuolisille Telecom-mastoille. Työssä selvitetään aurinkosähköjärjestelmien toimintaa ja soveltuvuutta osana uusiutuvalla energialla toimivaa energiantuotantojärjestelmää.

Työn tarkoituksena on myös yhteistyönä Jukka Kankaan kanssa mitoittaa hybridijärjestelmä valittuun kohteeseen tietyn tehoiselle telekommunikaatiomastolle ottaen huomioon järjestelmän investointi- ja elinkaarikustannukset sekä verrata kustannuksia pelkääseen diesel generaattorin tuottamalla energialla toimivaan telekommunikaatiomastoon. Tämä työ sisältää hänen kanssaan yhteistyössä kirjoitettuja osia, joita ovat kappaleet 2 ja 5. Työssä selvitetään myös hybridijärjestelmään vaadittavia etähallintamahdollisuuksia ja ratkaisuja, joita tarvitaan järjestelmän ylläpitämiseen ja seurantaan.

## 2 HYBRIDIJÄRJESTELMÄ-HANKE

Hankkeen tarkoituksena on kehittää itsenäinen etähallittu energiantuotantojärjestelmä verkon ulkopuolisille Telecom-mastoille käyttämällä hyödyksi aurinko- ja tuulienergiaa. Näillä uusiutuvilla energialähteillä ladataan Telecom-mastoa ylläpitävää akustoa, minkä rinnalla on toiminnan varmistava dieselgeneraattori. Hanke suuntautuu ensisijaisesti kehittyviin maihin, joissa sähköverkko on heikko tai joissa verkkoa ei ole ollenkaan. Pääkohteina ovat muun muassa Afrikassa sijaitsevat maat Uganda, Tansania ja Kenia saman hintatasonsa takia verrattuna Suomeen (Kuva 1.).



**KUVA 1 Hybridijärjestelmän pääkohteet Uganda, Tansania ja Kenia Afrikan kartalla (Frontier Strategy Group. 2015.)**

Maailmassa on 1-1.5 miljoonaa Telecom-mastoa epäluotettavassa sähköverkossa, joista verkon ulkopuolisia mastoja on noin 640 000 kappaletta. (Saviva Research, toukokuu 2013.) Näistä verkon ulkopuolisista mastoista kaksi on Suomessa. Suurin osa verkon ulkopuolisista mastoista toimii dieselgeneraattoreilla, jotka kuluttavat polttoainetta noin 1500 litraa kuukaudessa. Tämä tarkoittaa, että maston luona on käytävä 10 – 11 päivän välein ylläpitämässä ja tankkaamassa laitteistoa. Ylläpitokustannuksia lisää myös generaattorin uusiminen kolmen – viiden vuoden välein. (Saviva.)

Aurinko- ja tuulivoimalla saadaan lähes huoltovapaa sähköntuotantojärjestelmä. Aurinkopaneelit eivät käytännössä tarvitse huoltoa ja tuulivoimalaakin huolletaan vain harvoin. Akuston elinikä on akkutekniikasta riippuen myös noin 10 vuotta oikeanlaisella lataussyklillä ja oikeanlaisessa käyttölämpötilassa.

## 2.1 Telecom- masto

Telecom- eli telekommunikaatiomasto sisältää erinäisiä langattomaan viestintään ja tiedonsiirtoon liittyviä laitteita ja laitekokonaisuuksia. Mastot pitävät yllä paikallisia ja sitä kautta maailmanlaajuisia langattomia viestintäyhteyksiä. Uusiutuvalla energialla toimivia telekommunikaatiomastoja on toiminnassa jo noin 55 000 kappaletta (Saviva.) (Kuva 2.).



**KUVA 2 Uusiutuvalla energialla toimiva telekommunikaatiomasto (UGE. 2015)**

## 2.2 Telecom-maston laitteet ja energiankulutus

Suomessa tyypillisen maston laitteiston tehon tarve on 3 – 4 kW. Kulutus pysyy pääsääntöisesti vakiona, mutta kuumimpina kesäpäivinä jäähdytyksen lisäämiseksi ilmanvaihtoa täytyy tehostaa. (Elisa. 2015.) Tyypillinen verkon ulkopuolinen masto on tehollaan 2 – 8,5 kW. (Saviva. 2015.) Jäähdytykseen tarvittava energia kohdemaissa on

huomattavasti suurempi kuin Suomen olosuhteissa. Tämä lisää kulutuspiikkejä päivisin ympäri vuoden.



### 3 AURINKOSÄHKÖ

Auringon säteilystä tuotettua sähköenergiaa on alettu hyödyntää rakennuksien omavaraisessa sähköntuotannossa jatkuvan sähkön hinnan nousun ja etenkin aurinkopaneelien hintojen laskun ansiosta. Tässä luvussa käsitellään auringosta saatavan energian hyödyntämisen historiaa ja toimintaperiaatetta, sekä erilaisia sovelluksia aurinkosähköjärjestelmälle. Luvun lopussa on selvitetty aurinkoenergian potentiaali hybridijärjestelmälle suunnitelluissa kohdemaissa.

#### 3.1 Yleisesti

Aurinkopaneeli keksittiin yhdysvalloissa jo 50-luvulla, jonka jälkeen sen perustekniikka on pysynyt käytännössä samana. (Aurinkoenergia.fi. 2015.) Valmistustekniikan kehityessä paneelien hinta suhteessa saavutettuun paneelitehoon on kuitenkin pienentynyt, jonka ansiosta aurinkosähköjärjestelmät ovat alkaneet yleistymään. Ihmiset ovat alkaneet myös tiedostamaan järjestelmien mahdollisuudet sekä helppouden niiden olemattomien huolto- ja ylläpitokustannuksien takia. Monien uusien talojen arkkitehtuurisessa suunnittelussa on jopa otettu aurinkosähköjärjestelmän asennus huomioon, esimerkiksi erikoisissa kattoratkaisuissa, jotka mahdollistavat paneelien asennuksen optimaaliseen kulmaan. Aurinkopaneelien asennus on näin helpompaa ilman erillistä kallistuskulman optimointia raskailla asennustelineillä. (Kuva 3.)



**KUVA 3 Finnwindin asentama 6 kW<sub>p</sub> aurinkosähköjärjestelmä Oulussa. (Finnwind. 2014.)**

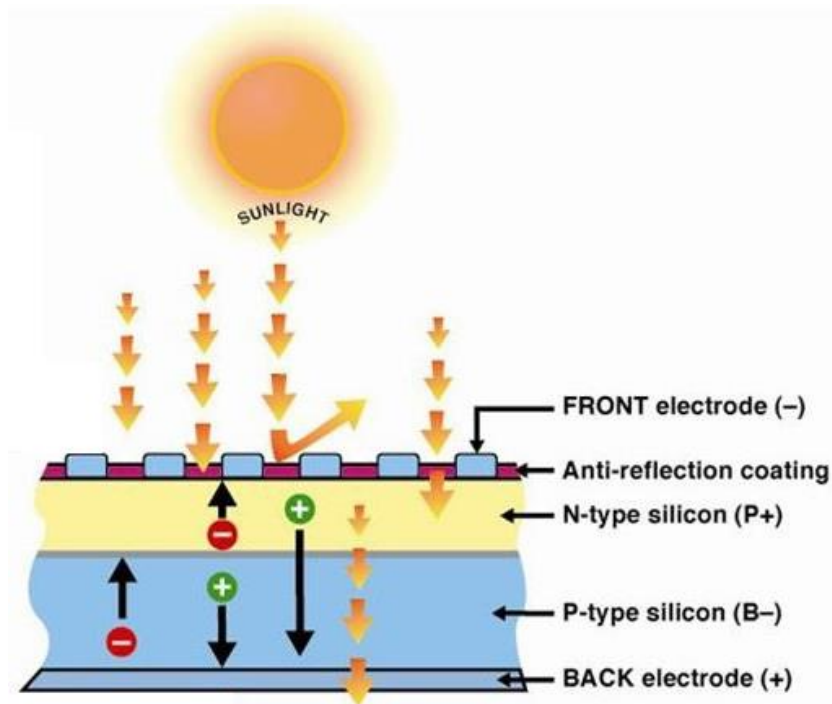
Auringolla tuotettua sähköenergiaa käytetään kiinteistöissä muun muassa käyttöveden lämmitykseen, tuloilman jäähdytykseen sekä esimerkiksi jatkuvasti käytössä oleviin laitteisiin eli vähentämään ulkoisen energian käyttöä. Omaan käyttöön oikein mitoitettulla järjestelmällä saadaan järkevä takaisinmaksuaika kun verkkoon syötetty energia on vähäistä.

### 3.2 Toimintaperiaate

Aurinkosähköpaneelit koostuvat sarjaan liitetyistä aurinkokennoista (Kuva 4.), jotka on suojattu koteloinnilla. Kenno muodostuu kahdesta erilaisesta puolijohdekerroksesta, joiden materiaalina käytetään tavallisimmin piitä (Kuva 5.). Toinen kerros on negatiivinen eli n-tyyppinen ja toinen positiivinen eli p-tyyppinen materiaali. (Kompo2010. 2015.)



**Kuva 4 Yksi piipuolijohdekenno (Kompo2010. 2015.)**



**KUVA 5 Aurinkopaneelin toimintaperiaate (TechHydra. 2015.)**

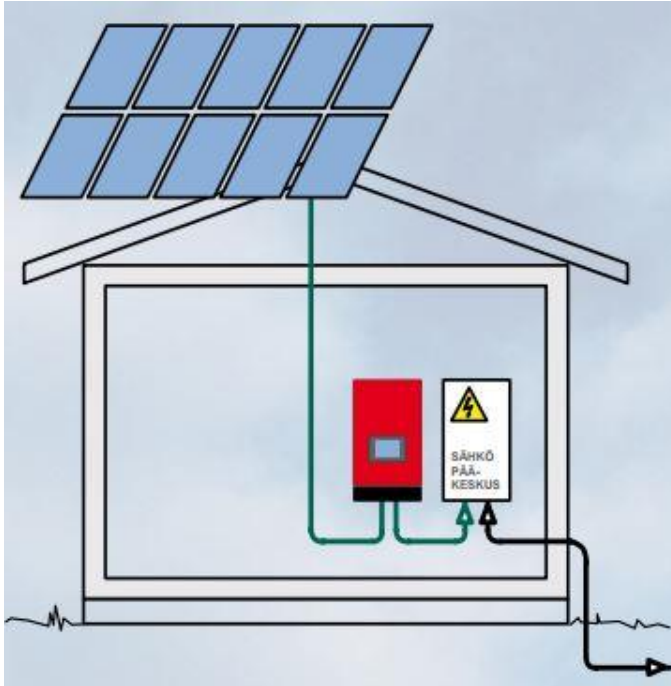
Auringon säteiden osuessa aurinkokennoon elektronit siirtyvät kerrosten välisen rajapinnan yli ja kasautuvat sen toiselle puolelle. Tätä kutsutaan valosähköiseksi ilmiöksi, joka aiheuttaa kennoon sisäisen sähkökentän eli jännitteen kerrosten yli.

### 3.3 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmä on yleisimmin verkkoon kytkettävä- tai itsenäinen akkuja lataava järjestelmä. Verkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä vaatii toimiakseen sähköverkon johon tahdistua. Se ei siis kykene toiminaan itsenäisesti esimerkiksi sähkökatkon aikana.

### 3.3.1 Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä

Verkkoon kytkettävä aurinkovoimala (Kuva 6.) koostuu sarjaan kytketyistä aurinkopaneeleista, joista tuotettu tasasähkö johdetaan invertterille. Invertteri muuntaa tasavirran vaihtosähköksi.

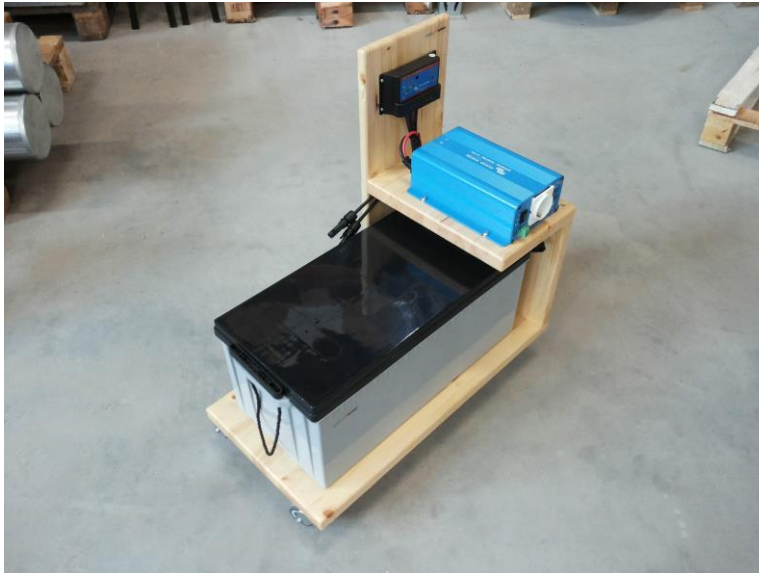


**KUVA 6 Aurinkosähkövoimala (Finnwind. 2015.)**

Invertteri kytketään verkkoon sähkömittarin kulutuspuolelle, kuten mikä tahansa toimilaite, johdonsuojakatkaisijan tai sulakkeiden kautta. Tuotettu sähköenergia ohjautuu automaattisesti kiinteistön kulutuslaitteille, mikäli kuormaa on käytössä. Muussa tapauksessa sähköenergia ohjautuu sinne missä kuormaa on, eli käytännössä valtakunnan sähköverkkoon.

### 3.3.2 Akkuja lataava aurinkosähköjärjestelmä

Sähköverkon ulkopuolisissa kohteissa voidaan paneeleilla tuotettu sähkö varastoida akkuihin lataussäätimen kautta ja käyttää akkuihin kytkettävällä invertterillä normaalina 230 V verkkosähköinä (Kuva 7.). Akkuja lataava aurinkosähköjärjestelmä on järkevä vaihtoehto esimerkiksi kesämökin sähköistykseen jos valtakunnan sähköverkkoa ei ole saatavilla tai syöttökaapelin asennus on haastava.



**KUVA 7 Finnwind C10 akkukärri sisältää akun, lataussäätimen ja invertterin helposti liikuteltavassa muodossa**

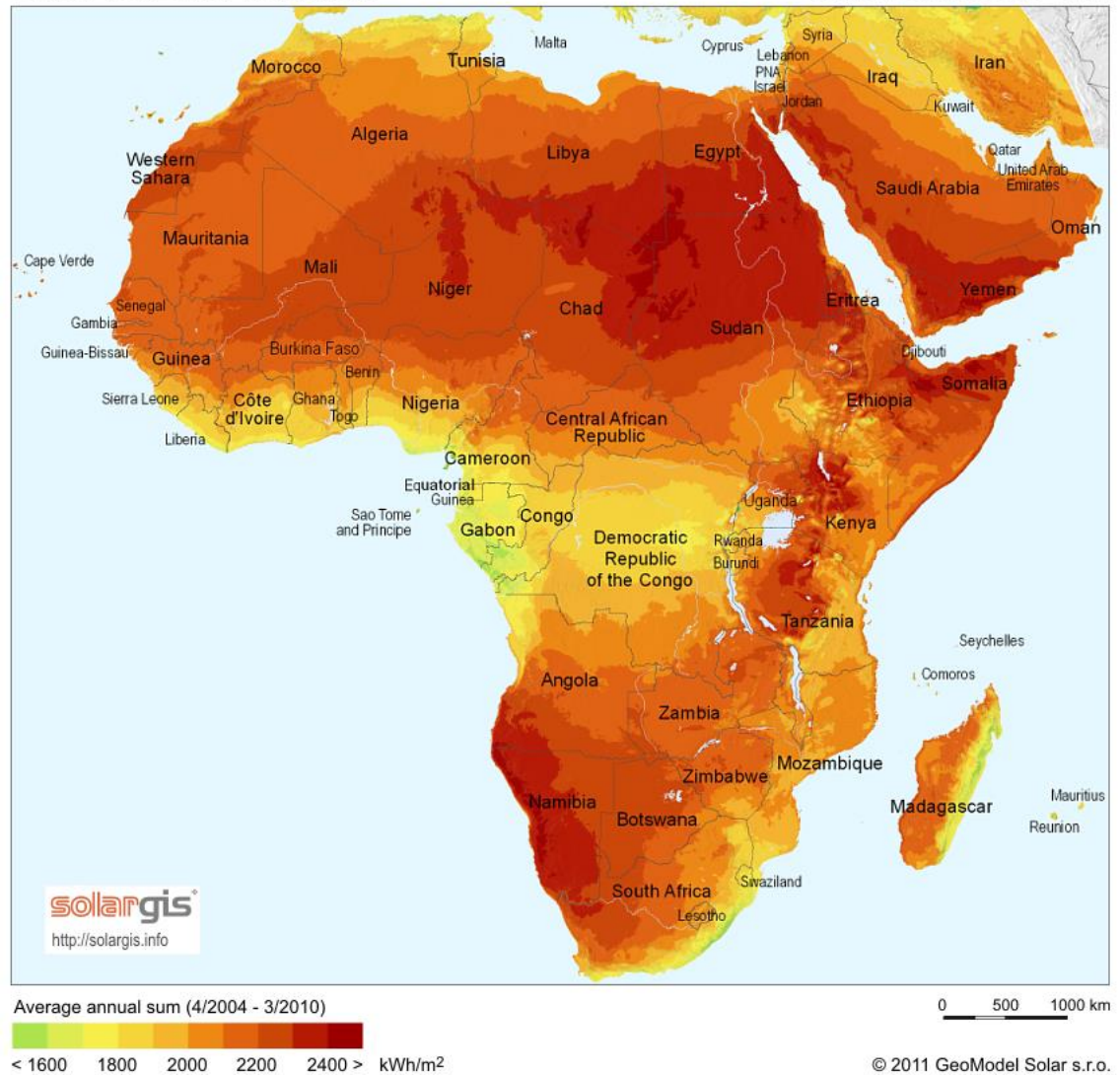
Aurinkosähköjärjestelmän investointihinta on yleensä vain murto-osa valtakunnan verkkoon liittymisestä tulevista kustannuksista. Valtakunnan verkkoon liittymiseen jälkeen on myös maksettava sähkön siirto- ja energiamaksut. Aurinkosähköjärjestelmän hankintainvestoinnin jälkeen tuotettu energia on ilmaista.

### 3.3.3 Aurinkoenergian potentiaali kohdemaissa

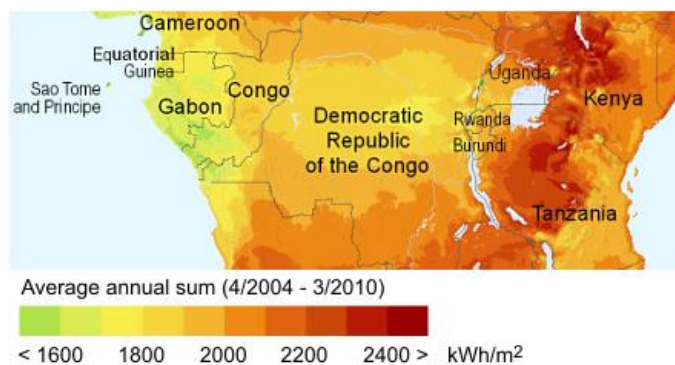
Hybridijärjestelmän aurinkovoimalan mitoittamiseksi tutkitaan paikallisia säteilyolosuhteita sekä päivän pituutta. Keskimääräiset säteilyolosuhteet Afrikassa ovat enimmäkseen 2000 - 2500 kWh/m<sup>2</sup> vuositasolla. (Kuva 8.)

## Global horizontal irradiation

## Africa and Middle East

**KUVA 8 Auringon säteilyenergian saatavuus, Afrikka (GeoSUN. 2011.)**

Paikallisesti tarkasteltuna Keniassa (Kuva 9.) voidaan yhden kilowatin aurinkosähköjärjestelmällä saavuttaa taulukon 1 mukainen vuotuinen tuotto. Kenian itärannikolla vuotuinen tuotto on kuitenkin hieman vähäisempää, kuin maan länsiosissa.

**KUVA 9 Auringon säteilyenergian saatavuus, Kenia (GeoSUN. 2011.)**



**TAULUKKO 1 Kenia Nairobi, keskimääräinen tuotto yhden kilowatin aurinkosähköjärjestelmällä (JRC. 2015.)**

Fixed system: inclination=0°, orientation=0°				
Month	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	4.94	153	6.82	211
Feb	5.09	143	7.08	198
Mar	5.23	162	7.26	225
Apr	4.24	127	5.82	175
May	3.70	115	5.04	156
Jun	3.32	99.6	4.49	135
Jul	3.09	95.7	4.18	130
Aug	3.17	98.2	4.31	134
Sep	4.09	123	5.62	169
Oct	4.35	135	6.02	186
Nov	4.20	126	5.75	173
Dec	4.56	141	6.25	194
Yearly average	4.16	127	5.71	174
Total for year	1520		2090	

jossa

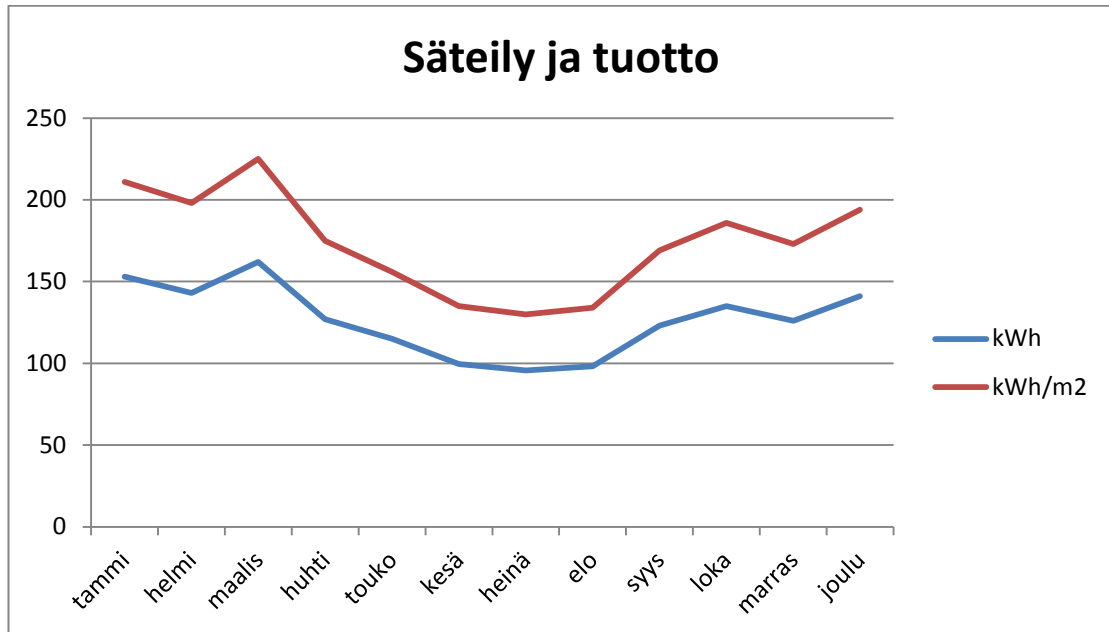
$E_d$  = asetetun järjestelmän sähköntuoton päivittäinen keskiarvo (kWh)

$E_m$  = asetetun järjestelmän sähköntuoton kuukausittainen keskiarvo (kWh)

$H_d$  = asetetun järjestelmän päivittäinen säteilysumma asetettuun kulmaan ja ilmansuuntaan neliön alueelle (kWh/m<sup>2</sup>)

$H_m$  = asetetun järjestelmän kuukausittainen säteilysumma asetettuun kulmaan ja ilmansuuntaan neliön alueelle (kWh/m<sup>2</sup>)

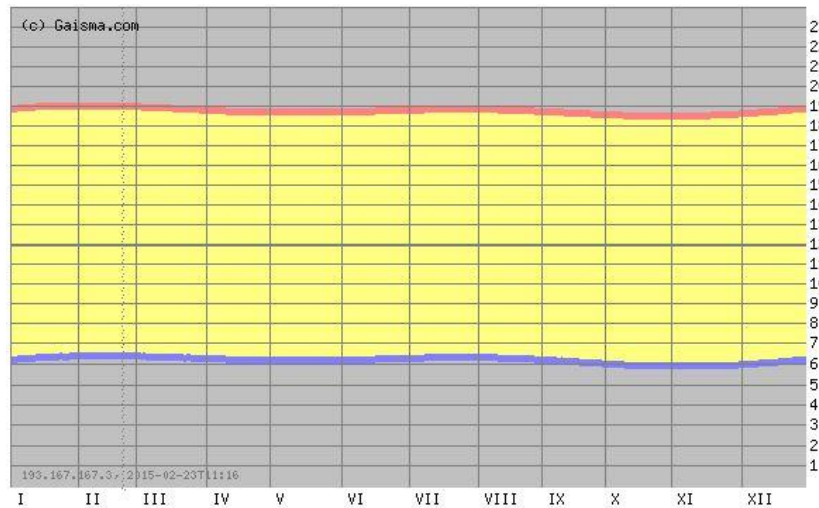
**TAULUKKO 2 Kuukausittainen säteily ja tuotto vuoden aikana 1kW<sub>p</sub> aurinkosähköjärjestelmällä Nairobissa.**



EU-projektin PVGIS-aurinkosähkölaskurilla saaduista taulukon 2 arvoista vuotuiseksi 1kW<sub>p</sub> aurinkosähköjärjestelmän tuotoksi muodostuu noin 1520 kWh. Laskuri ottaa huomioon paikallisista lämpötiloista ja alhaisen säteilytysvoimakkuuden tasosta johtuvat häviöt (12,5 %), auringon säteilykulmasta aiheutuvat heijastushäviöt (2,9 %), kaapeleista ja invertteristä yms. johtuvat häviöt (14 %) sekä paneelijärjestelmän häviöt (26,9 %). Vastaava järjestelmä Suomessa Tampereella optimaalisella asennuskulmalla tuottaa vuodessa noin puolet vähemmän.

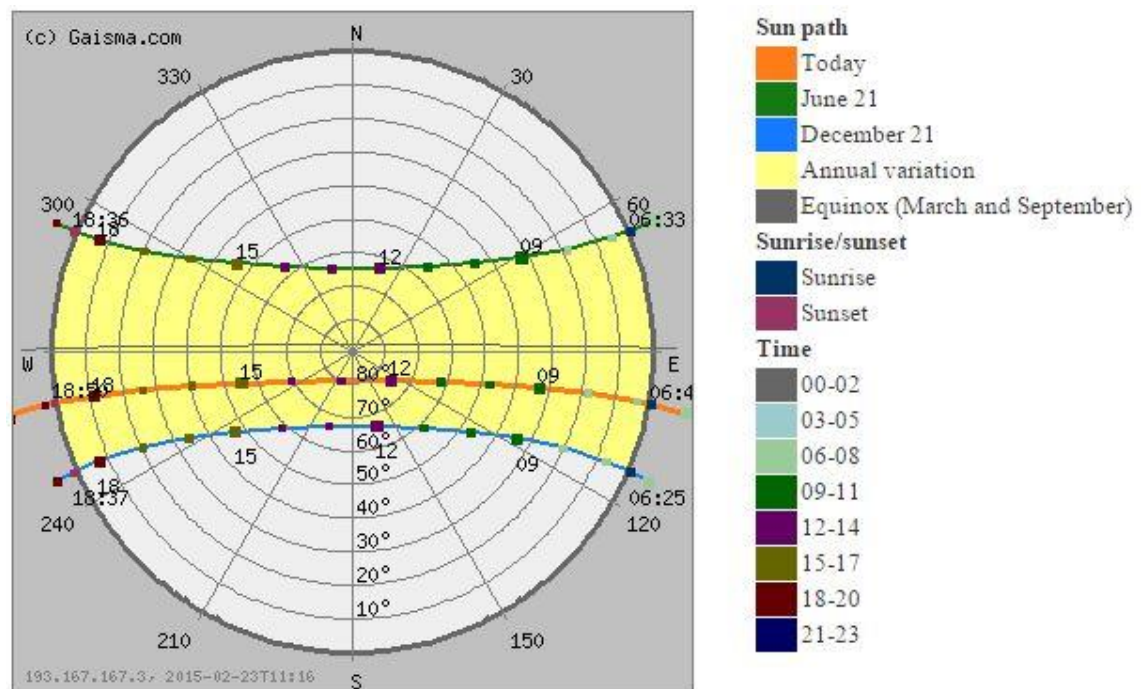
Päiväntasaajalla päivän pituus on koko vuoden keskimäärin 12 tuntia (Kuva 10.). On lisäksi huomioitava, että auringonsäteily on heikompaa kesäkuukausina. Haasteeksi muodostuu kuitenkin vuorokauden toinen puolisko, jolloin aurinkoenergiaa ei ole saatavilla.





**KUVA 10 Päivän pituus, Kenia Nairobi (Gaisma. 2015.)**

Paneelien asennuskulmalla ei päiväntasaajalla ole sähköntuoton kannalta käytännön merkitystä, koska aurinko säteilee aina yhtä pitkään lähes kohtisuoraan paneelin pintaan eri vuodenaikoina. Likaantumisen minimoimiseksi paneelit kannattaa asentaa pieneen kulmaan, eli noin 15-20 asteeseen, kuitenkin itä-länsi suuntaisesti johtuen auringon kulkureitistä (Kuva 11.).



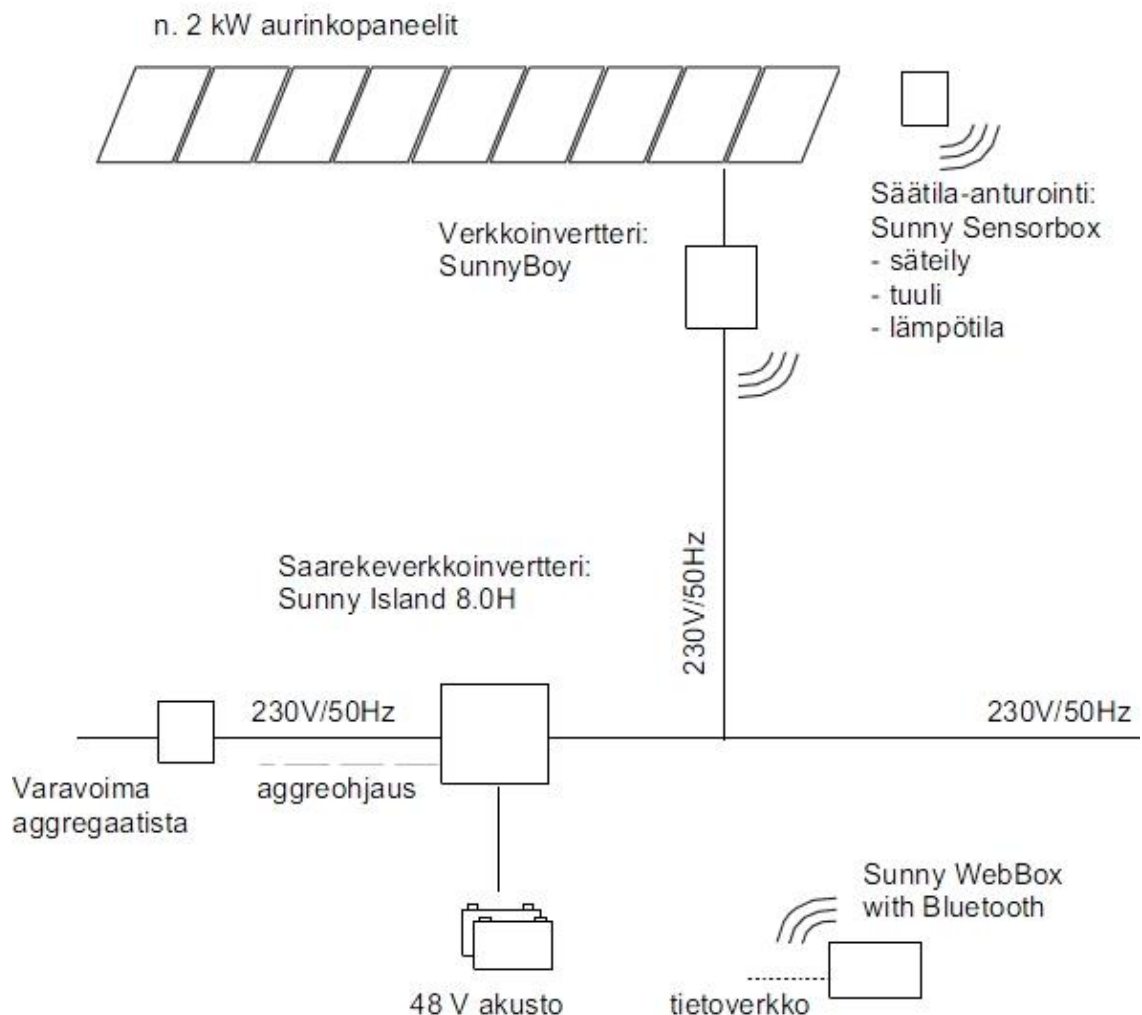
**KUVA 11 Auringon kulkureitti ja säteilykulma, Kenia Nairobi (Gaisma. 2015.)**

Valmistaja suosittelee myös pienimmäksi asennuskulmaksi 15 astetta. (Solarwatt. 2015.) Päivittäisen tasaisen tuoton saamiseksi paneelit kannattaa sijoittaa molempiin ilmansuuntiin, jotta päivän aikana saatu tuotto olisi mahdollisimman tasainen.

#### 4 HYBRIDIJÄRJESTELMÄN LAITTEISTO

Toimiakseen hybridijärjestelmä tarvitsee rinnalleen tehoelektroniikkalaitteita, joiden avulla järjestelmä kytketään yhteen toimivaksi kokonaisuudeksi. Elektroniikkalaitteiden toimittajana toimivat yrityksen yhteistyökumppanit SMA, Victron Energy, ABB/Power-One, ja TriStar

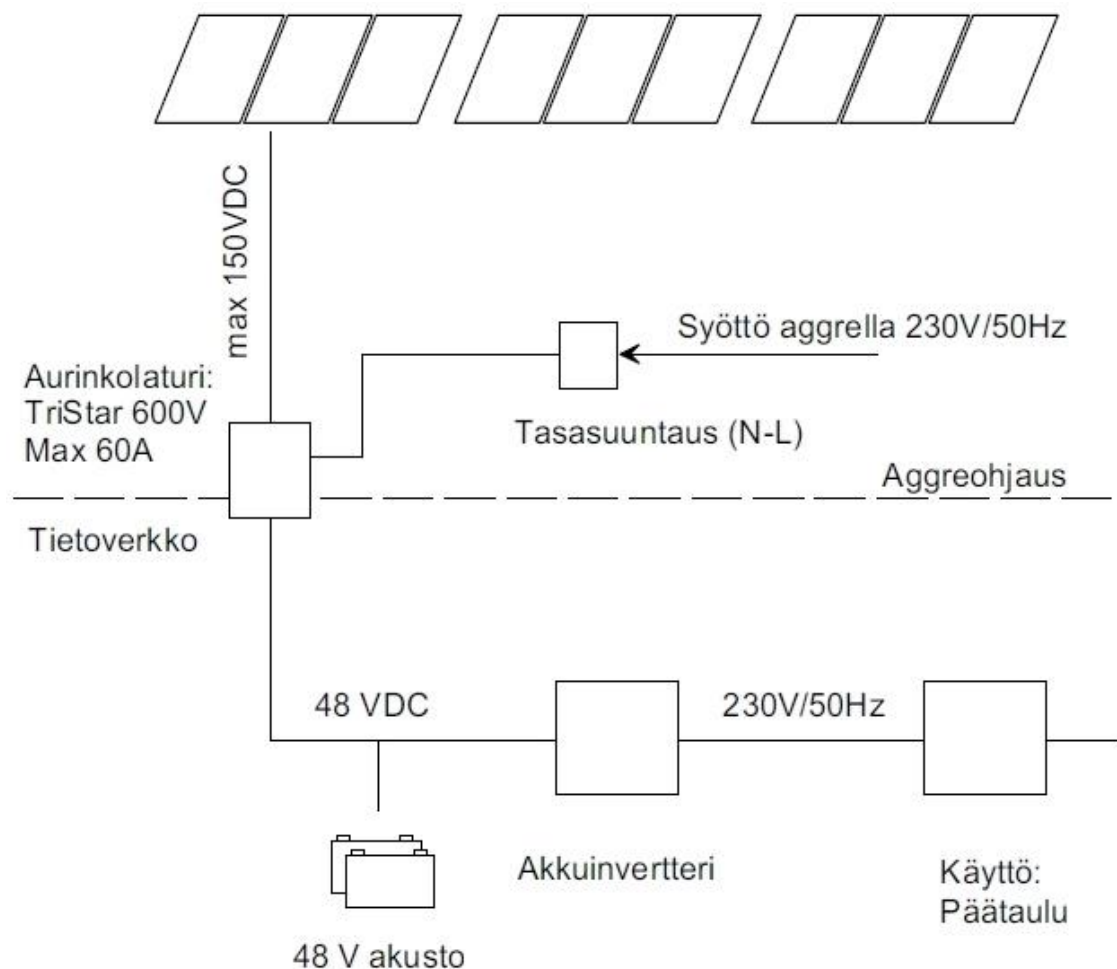
Aurinkovoimala kytketään hybridijärjestelmään saarekeverkkoinvertterin tai lataussäätimen kautta. Saarekeverkkoinvertterillä luodaan ulkopuolinen verkko, johon aurinko- ja tuulivoimala ovat kytkettyinä omien inverttereidensä kautta (Kuva 12).



**KUVA 12 Saarekeverkkoinvertterillä toteutettu aurinkovoimalan periaatekuva ja laitteet (Finnwind Oy. 2015.)**

Myös generaattori on kytketty järjestelmään saarekeverkkoinvertterin kautta. Saarekeverkkoinvertteri syöttää telekommunikaatiomaston laitteita, lataa akustoa sekä ohjaa myös generaattoria akuston varaustilan mukaan. Saarekeverkkoinvertteriksi soveltuu 4 kW mastolle esimerkiksi SMA:n Sunny Island 8.0H. Invertterin jatkuva teho on 6,0 kW, hetkellisesti jopa 11 kW. Akkuja pystytään lataamaan maksimissaan 140 A jatkuvalla virralla ja purkamaan 130 A virralla. Akuston koko voi olla 50 – 10 000 Ah. (SMA. 2015.) Saarekeverkkoinvertteri ei kuitenkaan sovellu suuritehoisille mastoille, koska markkinoilla ei ole riittävän suuria saarekeverkkoinverttereitä, jotka pystyisivät lataamaan akustoa vaadittavalla virralla. Saarekeverkkoinvertterit ovat myös huomattavasti kalliimpia kuin lataussäätimet.

Suuritehoisten mastojen kanssa on järkevää käyttää lataussäätimiä, jotka rinnankytkettyinä voivat ladata akkuja akuston vaatimalla virralla (Kuva 13.). Kyseiseen tarkoitukseen soveltuu esimerkiksi TriStar 600V lataussäädin.

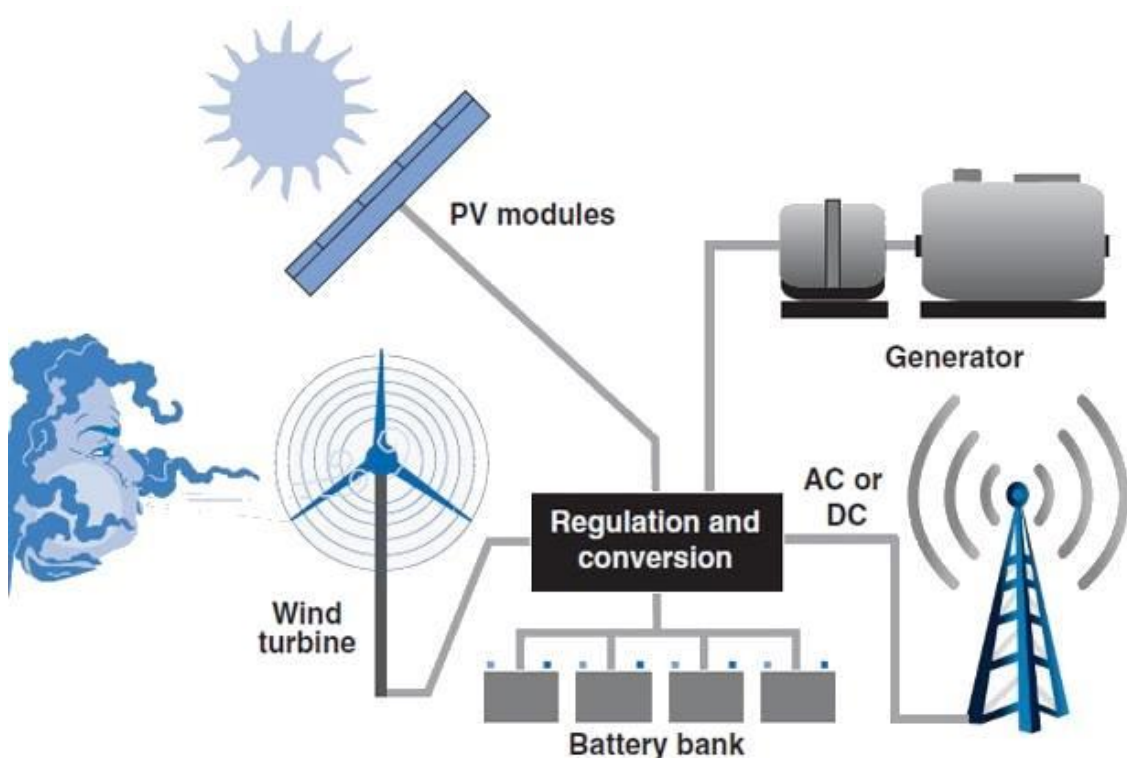


**KUVA 13** Lataussäätimellä toteutetun aurinkovoimalan periaatekuva ja laitteet. (Finnwind Oy. 2015.)

Lataussäätimet eivät aseta aurinkovoimalan teholle ylärajavaatimusta, vaan ainoa rajoittava tekijä on lataussäätimen sisääntulojännite. Yhteen TriStar MPPT 150 VDC -lataussäätimeen voi asentaa neljä sarjaan kytkettyä aurinkopaneelia rinnan, joiden yhteisteho on noin yksi kilowatti. (Morningstar. 2015.)

## 5 HYBRIDIJÄRJESTELMÄN MITOITUS

Sähköntuotantoon tarkoitettu hybridijärjestelmä koostuu akustosta, sitä lataavista aurinkopaneeleista ja tuulivoimaloista, sekä varavoimageneraattorista (Kuva 14.). Paneelien ja tuulivoimaloiden määrä mitoitetaan järjestelmään maston laitteiden ja jäähdytyksen kuluttaman tehon sekä saatavilla olevan energiamuodon mukaan.

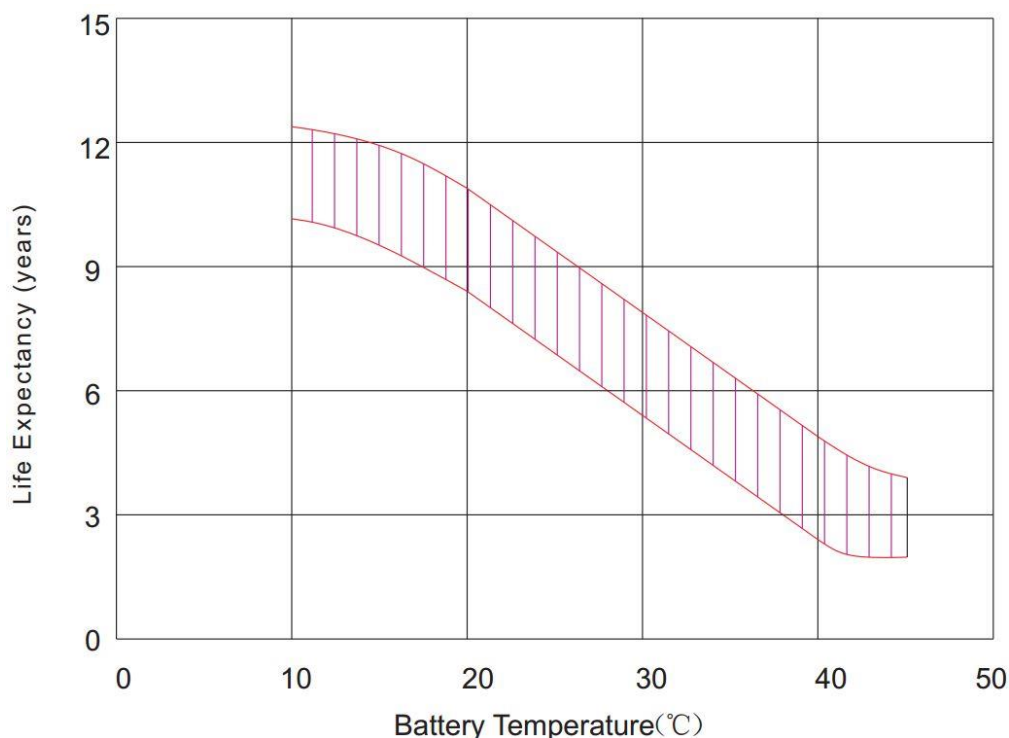


**KUVA 14. Telekommunikaatiomaston hybridijärjestelmän periaatekuva (alkuperäinen kuva EEP. 2014.)**

### 5.1 Akkukapasiteetin tarve

Koska uusiutuvan energian saanti ei aina ole taattua, tarvitaan energiavarasto, johon esimerkiksi päivän aikana auringosta saatu energia varastoidaan. Hybridijärjestelmän energiavarastona on useasta 12 voltin akusta koostuva akusto. Akkujen määrä mitoitetaan maston laitteiden ja tarvittavan ja varastoitavan energiamäärän mukaan. Jos esimerkiksi yöllä tuuliolosuhteet eivät ole tuulienergian tuotannon kannalta suotuisat, pitää akuilla selvittää koko yö ja pahimmassa tapauksessa seuraava pilvinen päivä.

Järkevät akkuvaihtoehdot ovat joko huoltovapaa AGM-akku tai pitkäikäinen litiumakku. AGM- ( Absorbent Glass Mat) akun suunniteltu elinikä on noin 10 vuotta. Se on rakenteeltaan raskas ja tilaa vievä, mutta edullinen investoinniltaan sekä soveltuva luovuttamaan isoja virtoja lyhyessä ajassa. AGM-akku kestää myös hyvin syväpurkautumista, josta se pystyy palautumaan ennalleen. Syväpurkautuminen vaikuttaa kuitenkin akun elinikään dramaattisesti (Victron Energy. 2015.). Akun käyttöikä on myös erittäin riippuvainen käyttölämpötilasta (Kuva 15.).



**KUVA 15. Ritar RA12-200B akun käyttöiän ja käyttölämpötilan suhde (Ritar. 2015.)**

Kuvaajasta huomataan, että on tärkeää kiinnittää huomiota akustotilan riittävään ilmanvaihtoon, jotta pysytään akun suunnitellussa käyttöiässä. Lisäksi etenkin lämpimissä maissa akuston sisältävään tilaan on lisättävä erillinen jäähdytyslaitteisto. Tärkein AGM-akun elinikään vaikuttava tekijä on kuitenkin purkaussyklariteiden syvyys ja niiden lukumäärä (Kuva 16.). Jos esimerkiksi purkaussyklariteiden syvyys on 50 % akun kapasiteetista, voidaan saavuttaa 600 syklin elinkaari. Hybridijärjestelmään mitoitettun akuston sykli voisi olla vuorokautinen, eli voitaisiin ajatella, että joka yö mastoa käytettäisiin akustolla. Tällöin vuodessa syklejä olisi enimmillään 365. AGM-akkujen elinikä olisi tässä tapauksessa noin kaksi vuotta.

<b>Technology: flat plate AGM</b>	
<b>Terminals: copper</b>	
Rated capacity: 20 hr discharge at 25 °C	
Float design life: 7-10 years at 20 °C	
Cycle design life:	
400 cycles	at 80% discharge
600 cycles	at 50% discharge
1500 cycles	at 30% discharge

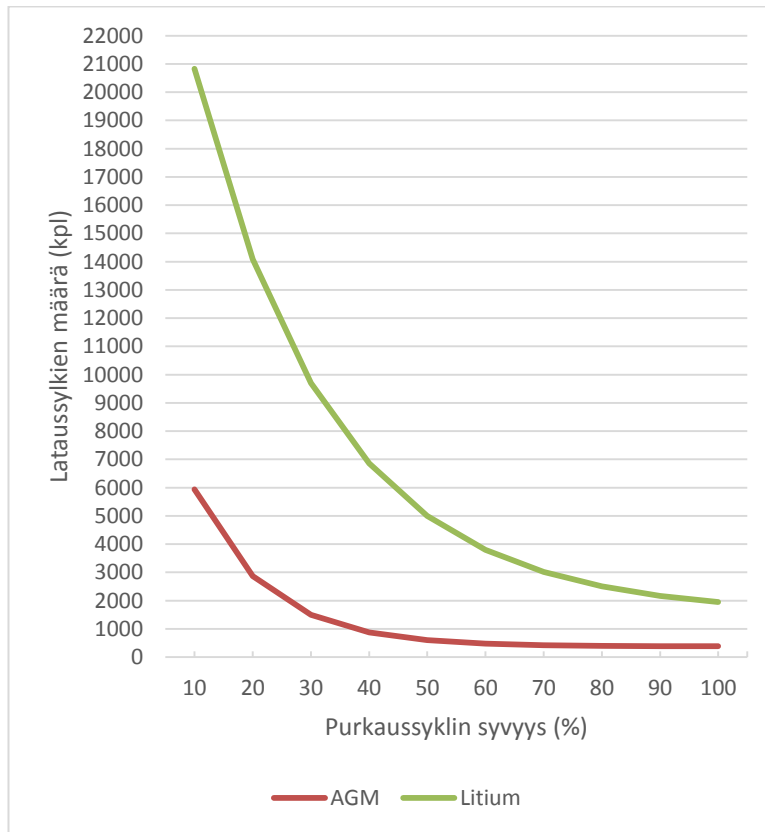
#### KUVA 16. AGM-akun yleiset määritelmät (Victron Energy. 2015.)

Litiumakut (LFP) ovat lyijyakkuihin verrattuna 70 % kevyempiä ja tilaa säästävämpiä. Ne ovat energiatehokkaita, eivätkä tyhjene mikäli jäävät pitkiksi ajoiksi käyttämättä. Akkua ei myöskään tarvitse ladata täyteen eliniän säilyttämiseksi, vaan se jopa paranee, jos akkua ei pidetä täyteen ladattuna. Kun lyijyakun latauskapasiteetti heikkenee jopa alle 50 prosentin varaustilan noustessa yli 70 prosentin, varautuu litiumakku vielä yli 90 % hyötysuhteella varaustilan ollessa korkealla. (Victron Energy. 2015.). Litiumakuilla saadaan siis paljon enemmän tarjolla olevaa uusiutuvaa energiaa varastoitua ja näin ollen parannettua järjestelmän hyötysuhdetta akkujen varauksen ollessa lähes täynnä. Litiumakustoa ei ominaisuuksiensa puolesta tarvitse ylivoimaisesti niin paljon, koska lataus- ja purkaus- ja syklien määrä ei vähene purkaussyklien syvyydestä riippuen niin voimakkaasti (Kuva 17.).

CYCLE LIFE	
80% DoD	2500 cycles
70% DoD	3000 cycles
50% DoD	5000 cycles

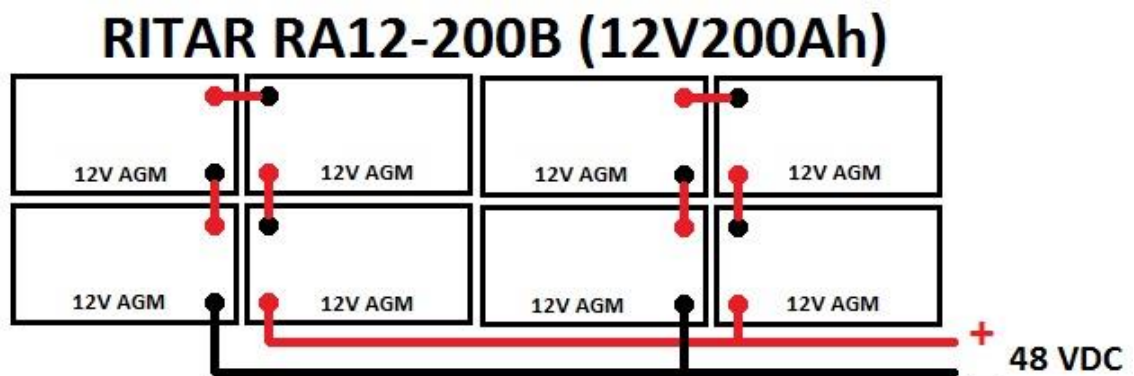
#### KUVA 17. Litiumakun purkaussyklien määrä eri purkaussyvyyksillä (DoD, depth of discharge) (Victron Energy. 2015.)

Verrattuna AGM-lyijyakun kahteen vuoteen, saadaan litiumakun käyttöiäksi 50 % purkaussyklien syvyydellä noin 14 vuotta. Valmistajan ilmoittamista purkaussyklien lukumääristä voidaan muodostaa kuvaajat, joilla voidaan havainnollistaa purkaussyklien määrää eri purkaussyvyyksillä (Kuva 18.). Saatujen kuvaajien avulla voidaan laskea tarkemmin mitoitettujen akustojen elinikä eri purkaussykleillä.



**KUVA 18. Kuvaajat purkaussyklin syvyydestä suhteessa lataussykliin määrään**

Useimmat telekommunikaatiomaston laitteet toimivat 48 voltin tasajännitteellä (Viestintävirasto. Määräys 54. 2015.) jolloin laitteet on helppo kytkeä suoraan akustosta. Akut kytketään rinnan ja sarjaan niin, että akuston jännite on 48 voltia. (Kuva 19.) Muussa tapauksessa voidaan jännite laskea, nostaa tai muuntaa sopivaksi tasajännitemuuttajilla ja vaihtosuuntaajilla eri laitteita varten.



**KUVA 19. Kaksi neljän akun sarjaa kytkettynä rinnan 48 VDC akustoksi**



Jos oletetaan tyypillisen maston laitteiden jatkuvan yhteenlasketun keskitetyn olevan 4 kW, voidaan akuston koko laskea yksinkertaisesti jakamalla yön aikana kulutettu energia akuston jännitteellä taulukon 3 mukaan.

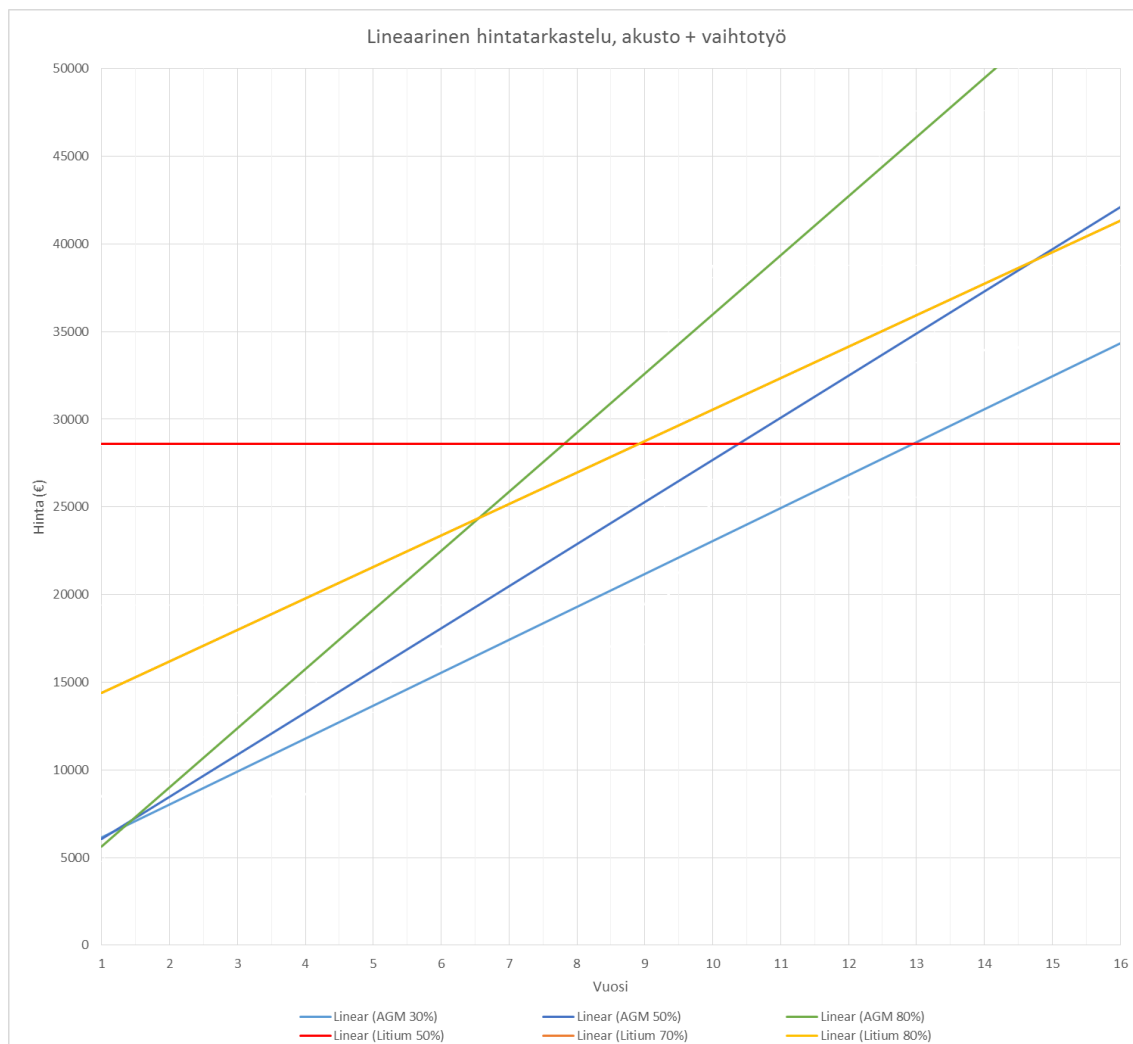
### TAULUKKO 3. AGM- ja litiumakuston mitoitus ja elinkaarilaskelmat yöllä kulutetun energian mukaan

AGM 50%			Litium 80%		
Selite	Arvo	Yksikkö	Selite	Arvo	Yksikkö
Maston vaadittu teho	4000	W	Maston vaadittu teho	4000	W
Yön pituus	12	h	Yön pituus	12	h
Kulutettu energia yöllä	48	kWh	Kulutettu energia yöllä	48	kWh
Akkujärjestelmän jännite	48	V	Akkujärjestelmän jännite	48	V
Vaadittu akkukapasiteetti	1000	Ah	Vaadittu akkukapasiteetti	1000	Ah
Akuston purku	50	%	Akuston purku	80	%
Lataussykli	600	krt	Lataussykli	2500	krt
Syklille mitoitettu akkukapasiteetti	2000	Ah	Syklille mitoitettu akkukapasiteetti	1250	Ah
Yhden akun kapasiteetti	220	Ah	Yhden akun kapasiteetti	200	Ah
<b>Akkujen laskennallinen lkm (Victron 12V220Ah)</b>	<b>10</b>	<b>kpl</b>	<b>Akkujen laskennallinen lkm (Victron 12,8V/200Ah)</b>	<b>7</b>	<b>kpl</b>
<b>Akkujen todellinen lkm (48 V)</b>	<b>12</b>	<b>kpl</b>	<b>Akkujen todellinen lkm (48 V)</b>	<b>8</b>	<b>kpl</b>
Akuston tilavuus	0,36	m <sup>3</sup>	Akuston tilavuus	0,27	m <sup>3</sup>
Akuston paino	780	kg	Akuston paino	336	kg
Akkukapasiteetti	2640	Ah	Akkukapasiteetti	1600	Ah
Todellinen purkaussyvyys	37,88	%	Todellinen purkaussyvyys	62,50	%
Lataussykliä	970	krt	Lataussykliä	3566	krt
<b>Käyttöikä 25°C</b>	<b>2,7</b>	<b>v</b>	<b>Käyttöikä 25°C</b>	<b>9,8</b>	<b>v</b>

Vaadittu akkukapasiteetti ylimitoitetaan halutulla akuston purkusuiklin syvyydellä. Jos akustoa halutaan purkaa 50 %, täytyy akusto ylimitoitaa niin, että purun jälkeen akkukapasiteettia on jäljellä 50 %. Syklille mitoitettulla akkukapasiteetilla saadaan akkujen laskennallinen lukumäärä jakamalla arvo yhden akun kapasiteetilla. Akkujen määrä pitää kuitenkin sovittaa laitteiston jännitteelle sopivaksi, joten 12 V akkujen lukumäärä pitää olla neljällä jaollinen. Todellinen akkujen lukumäärä on siis AGM:llä 12 kappaletta ja litiumilla 8 kappaletta. Lataussyklit lasketaan vielä todelliselle akkumäärälle, jolloin saadaan teoreettinen määrä sykleille. On siis huomattava, että jos akkuja on lisättävä laskennalliseen akkujen lukumäärään, todellinen purku pienenee. Kun AGM-akuston purku on mitoitettu esimerkiksi 50 %:lle, todellinen purku on vain noin 38 %, koska akkuja on laskennalliseen lukumäärään nähden kaksi enemmän.

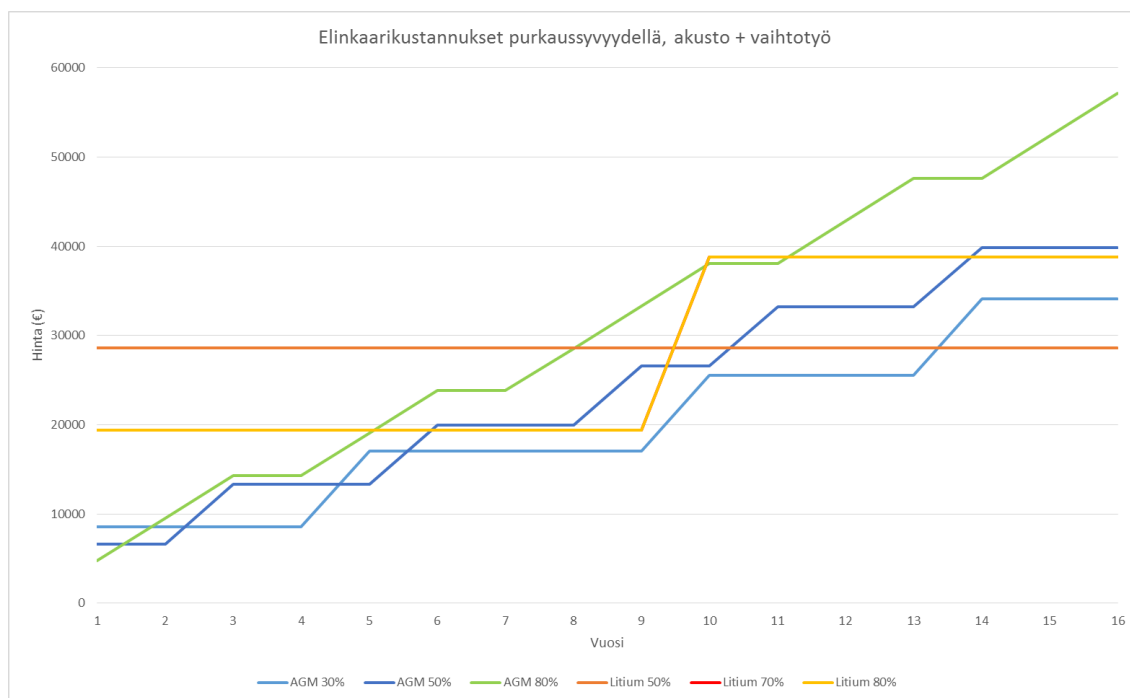
Todellisten lataussykliä avulla voidaan tarkastella akuston teoreettista käyttöikää suunnitellussa käyttölämpötilassa. Teoreettisella käyttöikäällä voidaan lineaarisesti tarkas-

tella akkujen elinkaarikustannusta 15 vuodelle (Kuva 20.). Laskennoissa ei ole otettu huomioon korkoprosenttia.



**KUVA 20. Lineaarinen hintatarkastelu, akusto + vaihtotyö**

Lineaarisella kuvaajalla voidaan tarkastella, miten kunkin akuston hinta jakaantuu vuositasetta. Kuvaajat muodostuvat akuston investointihinnasta sekä niiden uusimisesta ja vaihtotyöstä. Kuvaajasta huomataan, että litiumakusto 50 % purkusyvyydellä (punainen viiva) olisi halvin vaihtoehto 15 vuoden aikana suuresta investointihinnastansa huolimatta, koska akustoa ei tällä aikavälillä tarvitse vielä vaihtaa. Järkevä elinkaariseuranta-aika voisi kuitenkin olla 10 vuotta, jotta akuston investointikustannus olisi pienempi. Vertailemalla todellisia akustojen hintoja 10 vuoden elinkaarella (Kuva 21.) huomataan, että AGM akuston hinta on 30 ja 50 % purkaussyvyyksillä kuitenkin lähes sama kuin litiumakuston 70 ja 80 % purkaussyvyyksillä. Kyseessä olevilla litiumakustoilla ei tässä tapauksessa ole eroavaisuutta, koska molemmissa on kahdeksan akkua ja näin ollen sama laskennallinen purkaussyvyys.



**KUVA 21. AGM- ja litiumakkujen elinkaarikustannukset eri purkaussyvyyksillä, akusto + vaihtotyö**

Litiumakut ovat noin neljä kertaa kalliimpia kuin AGM-akut, mutta 10 vuoden elinkaaritarkastelulla kustannukset ovat käytännössä yhtä suuret johtuen AGM-akuston tiheästä vaihtovälistä.

Jos 4 kW mastolle valitaan investointikustannuksiltaan halvin akustovaihtoehto, eli AGM 80 % purkaussyvyydellä, voidaan todeta, että se on todellisuudessa kallein vaihtoehto lyijyakuista jo kahden vuoden jälkeen ja litiumakkuihin nähden kahdeksan vuoden kohdalla. Järkevin akustovaihtoehto kymmenelle vuodelle laskelmien mukaan olisi litiumakuista litium 80 % purkaussyvyydellä tai lyijyakuista AGM 50 % purkaussyvyydellä. (Taulukko 4.) Taulukon yksikköhinnat ovat Victron Energyn vuoden 2015 listahintoja. Litiumakuston hinta koostuu kahdeksasta litiumakusta ja AGM-akuston kahdestatoista AGM-akusta. Akustojen hintojen jakautuminen vuodelle on laskettu jakamalla akuston hinta niiden elinkaarella.

**TAULUKKO 4. Litium 80 % ja AGM 50 % laskelmat 10 vuoden elinkaarella, korkoa ei huomioitu**

<b>Litium 80%</b>			<b>AGM 50%</b>		
Lataussyklin hinta	5,56	€	Lataussyklin hinta	25,75	€
Victron BAT512201400	2298	€	Victron BAT412201080	470	€
Akuston hinta	18384	€	Akuston hinta	5640	€
Vaihtotyön hinta	1000	€	Vaihtotyön hinta	1000	€
Kokonaishinta	19384	€	Kokonaishinta	6640	€
Hinta vuodessa	1977,959	€/a	Hinta vuodessa	2459,259	€/a
Lineaarisesti vertailtu elinkaarikustannus	19779,59	€	Lineaarisesti vertailtu elinkaarikustannus	24592,59	€

Parhaan hyödyn sijoittamalleen rahalle saa valitsemalla litiumakuston. Akuston vaihtoväli on noin 10 vuotta johtuen litiumakkujen aiemmin mainituista ominaisuuksista.

## 5.2 Varavoima

Varavoiman lähteenä hybridijärjestelmässä käytetään dieselgeneraattoria. Sitä hyödynnetään silloin, kun akuston kapasiteetti laskee alle mitoitettun purkaussyvyyden, eikä uusiutuvaa energiaa ole saatavilla. Varavoima ei välttämättä aiheuta lisäkustannuksia hybridijärjestelmään, koska lähtökohtaisesti käytetään jo olemassa olevaa varavoimaa lähde, jolla masto on tähän asti toiminut. Mikäli uusi varavoimanlähde kuitenkin tarvitaan, ylimitoitetaan se kohteen kuluttaman tehon mukaan niin, että saadaan katettua maston käyttämä teho ja ladattua myös akustoa.

Tähän tarkoitukseen sopiva varavoimalähde olisi esimerkiksi Mitsubishin 10DMW4 generaattori (Taulukko 5.) (HSAOY. 2015.)

**TAULUKKO 5. Hybridijärjestelmän varavoimageneraattori**

Selite	Arvo	Yksikkö
Generaattori	10DMW4	Mitsubishi
Generaattorin teho	10000	VA
Jatkuva teho	8000	W
Kulutus	3,3	l/h
Paino	283	kg
Hinta (alv 0%)	7846	€
Polttoainesäiliö	200	l
Käyntiaika/säiliö	60,6	h

Mitoituskohteessa Keniassa aurinkoenergiaa on vähiten saatavilla kesäkuukausina (luku 3, taulukko 1 ), kuten myös tuulivoimaa (Opinnäytetyö Pientuulivoima osana Hybridi-

sähköntuotantojärjestelmä, luku 4, taulukko 6). Mikäli uusiutuvan energian tuotantoa ei mitoiteta huonoimman kuukauden mukaan, on generaattorin käyttö näinä kuukausina välttämätöntä.

Huonoimman kuukauden mukaan mitoittaminen ei ole järkevää, koska hybridivoimala olisi muina vuodenaikoina suunnattoman ylimitoitettu kulutukseen nähden. Tuotettu energia menisi tällöin hukkaan, koska akkukapasiteetti ei riitä varastointiin. Akustoa ei ole myöskään kannattavaa tätä varten ylimitoittaa suurten kustannustensa vuoksi. Suurella ylimitoituksella ei tuotettua energiaa pystytä kaikkea käyttämään tai varastoimaan, ja näin ollen suurempien investointikustannuksien takia takaisinmaksuaika venyy suureksi.

### 5.3 Mitoitettu voimala – Nairobi

Voimalan mitoittamiseksi tulee selvittää telekommunikaatiomaston ja ilmastoinnin vaatima sähköteho. Paikallisten sääolosuhteiden mukaan selvitetään uusiutuvan energian saatavuus, jonka perusteella määritetään akuston käyttöaika vuorokaudessa tehotarpeen mukaan. Uusiutuvan energian tuotettava kapasiteetti määritetään niin, että katetaan maston vaatima jatkuva teho sekä varataan akuston kapasiteetti sinä aikana, kun uusiutuvaa energiaa on eniten saatavilla. Esimerkiksi Nairobissa, kun päivän pituus on keskimäärin 12 tuntia, pitää akuston varaustila saada tänä aikana mahdollisimman korkeaksi jäljellä olevia vuorokauden tunteja varten. Paikallisten tuoliolosuhteiden vuoksi on tuulienergian tuotto melko vähäistä, joten yksin tuulivoima ei pysty pitämään akuston varaustilaa riittävän korkeana.

Neljän kilowatin mastolle 200 ampeeritunnin litiumakkuja tarvitaan kahdeksan kappaletta (luku 5.1.1, taulukko 3). Tuotettavan energian määrä on taulukon 6 mukaan 36573 kWh vuodessa.

### TAULUKKO 6. Maston kulutus sekä mitoitetulla hybridijärjestelmällä saatu aurinkoenergian tuotto

Selite	Arvo	Yksikkö
Maston vaatima sähköenergia	35040	kWh/a
Kokonaisenergiankulutus jäähdytyksen kanssa	36573	kWh/a
Auringolla tuotettu osuus kokonaisenergiankulutuksesta	73,8	%
Auringon osuus tuotetusta energiasta	26973	kWh/a
Paneeliteho	17,8	kWp
Paneelien lkm	72	kpl
Paneelipinta-ala	120,96	m <sup>2</sup>
Paneelien paino	2304	kg

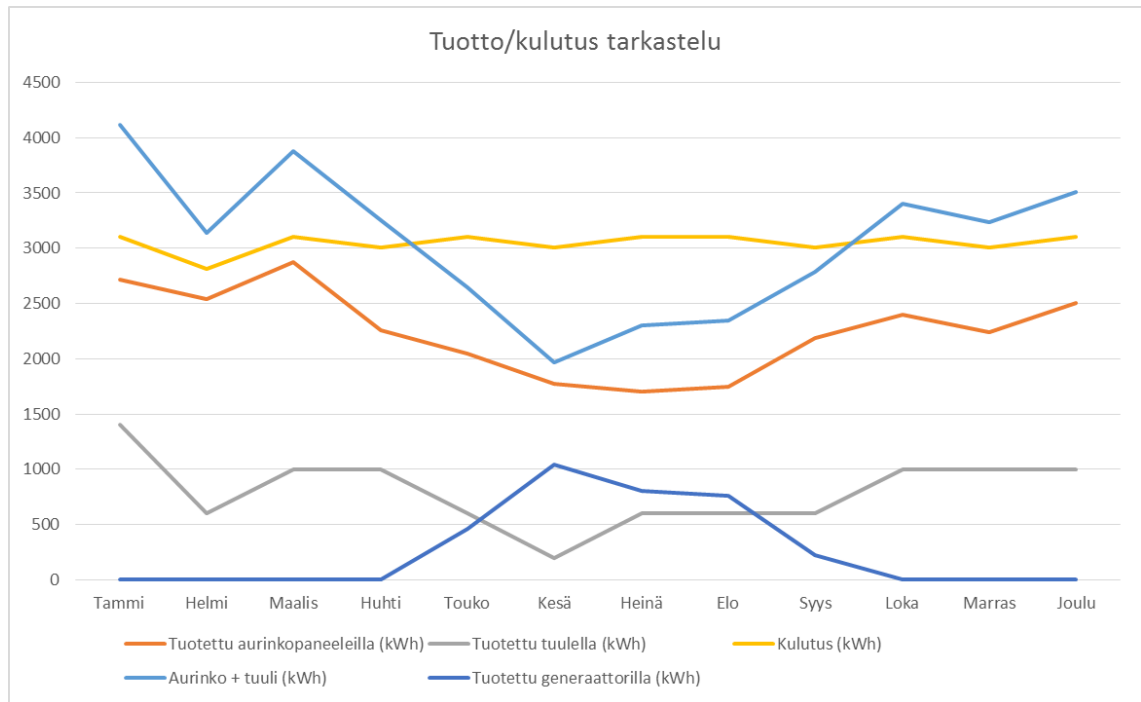
Tuulen osuus tuotetusta energiasta kahdella Tuule-pientuulivoimalalla on taulukon 6 keskituulennopeuksien mukaan laskettu määrä 9600 kWh vuodessa, joka on vaaditusta määrästä 26,2 % (Taulukko 7). Auringolla tuotettavaksi osuudeksi jää 73,8 %. Tämä tarkoittaa noin 121 neliömetrin suuruista aurinkovoimalaa, jonka paneeliteho on noin 18 kW<sub>p</sub>. Solarwatin 60P-mallin aurinkopaneeleja 250 Wp nimellisteholla tarvitaan siis 72 kappaletta (Taulukko 6.).

### TAULUKKO 7. Mitoitetulla hybridijärjestelmällä saatu tuulienergian tuotto

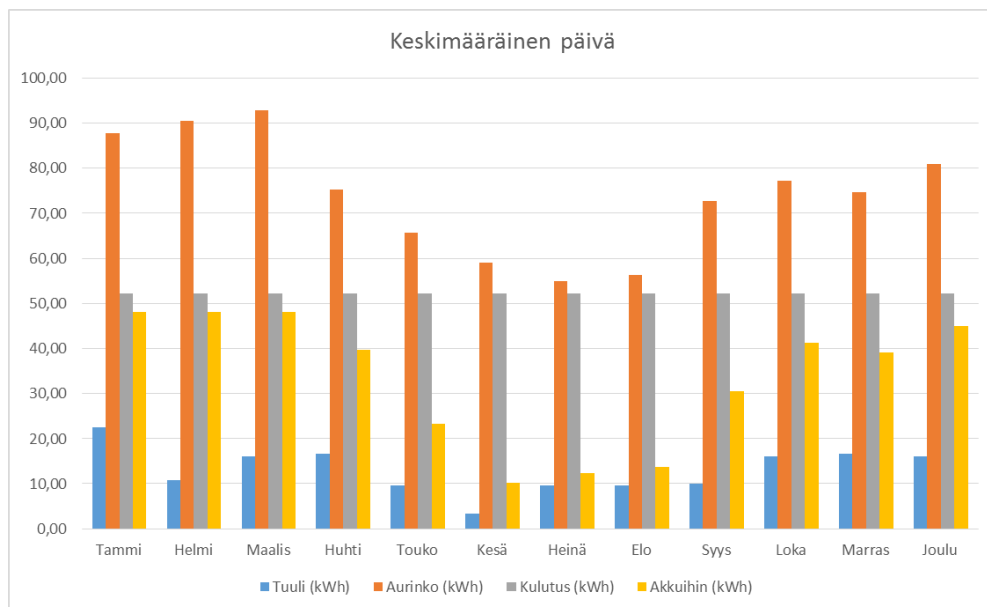
<b>Todellinen tuotto</b>	<b>9600</b>	<b>kWh/a</b>
<b>Tuulella tuotettu osuus</b>	<b>26,2</b>	<b>%</b>
Tuulimyllyjen paino	200	kg

Mitoitetun hybridijärjestelmän eri laitteistot liitetään yhdeksi kokonaisuudeksi (Kuva 22.). Periaatekuvassa aurinko- ja tuulivoimaloiden lataussäätimet on kytketty akuston rinnalle. Generaattorin syöttö on kytketty releohjauksen kautta tuulilaturiin. Akustoon varastoitu energia muutetaan akkuinverttereillä kulutuslaitteille sopivaan muotoon. Aurinko- ja tuulilaturit on liitetty samaan tietoverkkoon etähallintaa varten.



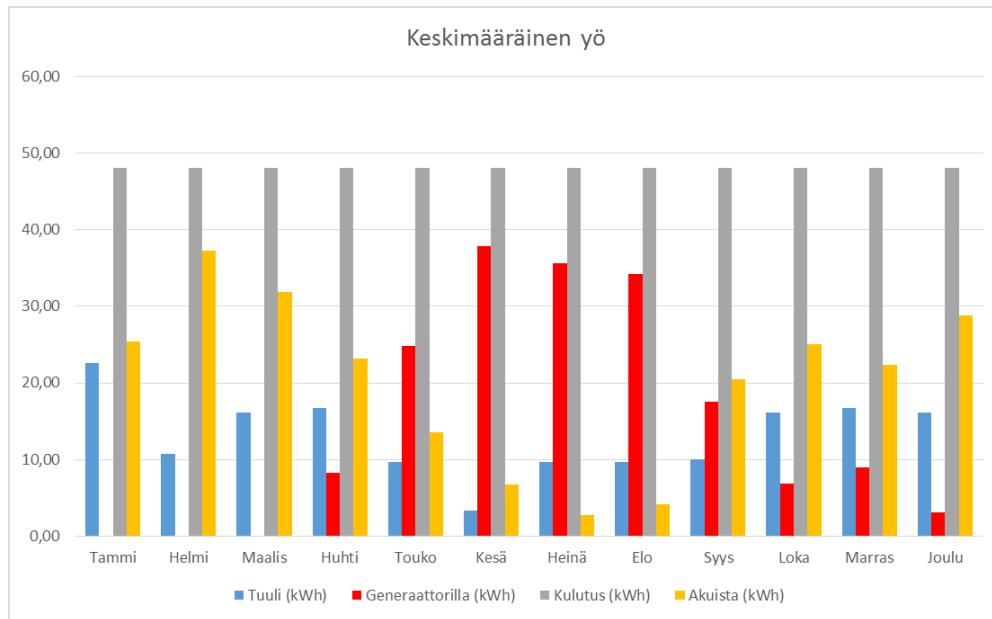


**KUVA 23. Mitoitetun hybridijärjestelmän tuotto- ja maston laitteiden kulutus-käyrät, Nairobi Kenia**



**KUVA 24. Hybridijärjestelmän eri kuukausien keskimääräinen päivän aikainen toiminta**





**KUVA 25. Hybridijärjestelmän eri kuukausien keskimääräinen yönaikainen toiminta**

Kuten edellisistä kuvista voidaan havaita, ei akuista pysty kesäkuukausina kattamaan kaikkea kulutusta yön aikana, koska päivällä niitä ei saada aina täysin varattua. Yön aikana generaattorin käyttö riippuu suurelta osin siitä, kuinka paljon tuulta on saatavilla, koska aurinkoenergiaa ei ole tarjolla lainkaan. Generaattorin käyttöä voidaan kuitenkin pienentää sallimalla akuston purkua syvemmäksi. Kun talvikuukausina tuulienergiaa on kohtuullisesti saatavilla, akkuja ei pureta oletusmitoituksen määrää, jolloin akkuja voidaan purkaa kesäkuukausina oletusmitoitusta enemmän sen vaikuttamatta akuston elinikään, koska vuosikohtainen akuston purku pysyy keskiarvoltaan suunnitellussa mitoituksessa.

#### 5.4 Etävalvontajärjestelmä

Telekommunikaatiomaston toiminnan varmistamiseksi on hybridijärjestelmää pystytetty valvomaan ja hallitsemaan etänä mahdollisten häiriö- ja poikkeustilanteiden varalta. Etävalvonnan avulla järjestelmän toiminnasta on saatavilla reaaliaikainen kokonaiskuva, jolloin mahdollisia poikkeustilanteita voidaan ennakoida ja häiriöihin pystytään vastaamaan välittömästi. Seuraamalla aurinkosähköjärjestelmän, tuulivoimalan, generaattorin ja muiden oleellisten seurantapisteiden tilaa ja suureita, saadaan järjestelmän toiminnasta kokonaisvaltainen kuva, jonka avulla voidaan toteuttaa tulevia huolto- ja korjaustoimenpiteitä. Jatkuvan toiminnan takaamiseksi järjestelmän kriittisistä seurantapisteistä

on saatava hälytys- tai vikatiedot, jotta tulevaan mahdolliseen poikkeustilanteeseen on aikaa reagoida riittävästi. Hybridivoimalan toiminnan kannalta tärkeitä seurantapisteitä eri järjestelmistä ovat;

Aurinkovoimala:

- Paneelijännite, virta, teho ja tuottotaulukko
- Invertterin/lataussäätimen tilatieto
- Säteilysanturin tieto
- Eristysvastus

Seuraamalla aurinkovoimalan sähkösuureita voidaan varmistua järjestelmän toiminnasta. Vertaamalla saatua energiaa auringon säteilyyn erillisen säteilysanturin avulla saadaan järjestelmästä myös hälytys, joka viittaa paneelien likaisuuteen tai muuhun ulkoiseen poikkeustilanteeseen. Invertterin tilatiedolla nähdään, koska se on toiminnassa. Invertteristä saadaan pihalle myös tuottotaulukot aurinkoenergian osalta. Invertteri mittaa myös kaapeleiden eristysresistanssia ja havaitsee mahdolliset vuodot tai oikosulut ja keskeyttää tällöin toimintansa.

Tuulivoimala:

- Jännite, virta, teho ja tuottotaulukko
- Invertterin/lataussäätimen tilatieto
- Käyttötunnit
- Tuulianturin tieto

Tuulivoimalan tehoa seuraamalla voidaan muodostaa tuottotaulukko, josta nähdään tuulella tuotetun energian osuus kokonaiskulutuksesta. Vertaamalla tuottoja myös laskennalliseen tuottoarvoon sekä tuulianturista saatuihin arvoihin, voidaan todeta tuulivoimalan oikeanlainen toiminta tai saada hälytys mahdollisesta poikkeustilanteesta, esimerkiksi jos tuulta on saatavilla, eikä voimala kuitenkaan tuota riittävästi sähköenergiaa. Käyttötuntien seurannalla saadaan ilmoitus tulevista huolloista. Invertterin tai lataussäätimen tilatiedolla nähdään, koska laitteisto on toiminnassa ja saadaan myös hälytys, jos se ei ole toiminnassa, vaikka tuulianturin mukaan tuulta olisi saatavilla. Invertteri seuraa myös eristysvastusta. Lataussäätimestä saaduilla arvoilla nähdään akuston latausjännite

ja latausvirta. Laitteista nähdään myös, koska tuulivoimala pyörii lisävastuksia vasten akkujen ollessa täynnä.

#### Generaattori:

- Säiliön polttoaineen määrä
- Öljyvahti
- Käyntitila ja käyttötunnit
- Lämpötila
- Tuotettu energia

Generaattorin säiliön polttoainemäärää on pystyttävä seuraamaan, jotta säiliö ei pääse tyhjenemään. Järjestelmästä saadaan ilmoitus, kun polttoainesäiliö on esimerkiksi puolillaan ja hälytys, kun polttoaine on vähissä. Käyntitilalla nähdään, koska generaattori on käynnissä ja voidaan saada hälytys, jos esimerkiksi generaattori on käynnissä samaan aikaan kun uusiutuvaa energiaa on saatavilla. Käyttötunneilla seurataan generaattorin huoltovälejä ja elinikää. Generaattorin lämpötilaseurannan avulla saadaan hälytys mahdollisesta vika- tai ylikuumentumistilanteesta. Tuotettua sähköenergiaa seuraamalla nähdään generaattorilla tuotetun energian osuus kulutetusta tehosta.

#### Muut

- Kokonaisenergiankulutus
- Jäähdytysilman lämpötila, ulkolämpötila, jäähdytettävän ilman lämpötila ja akuston lämpötila
- Akuston varaustila ja latausaste sekä elinikäseuranta
- Akkujen akkukennojen tasauksien seuranta
- Hälytysjärjestelmä/kulunvalvonta
- Kameravalvonta

## 5.5 Huolto ja ylläpito

Hybridijärjestelmän huoltotoimenpiteet ovat melko vähäisiä. Aurinkojärjestelmässä ei huoltotoimenpiteitä ole, mutta paneelien likaantumista kannattaa kuitenkin seurata. Normaaliolosuhteissa paneelit puhdistuvat sateella, mutta tarvittaessa paneelit puhdistetaan.

Tuulivoimalan suunniteltu huoltoväli on noin viisi vuotta. Huollossa luodaan yleiskatsaus voimalan kuntoon sekä tarkistetaan mekaaniset liitokset ja laakerivälit. Oletusarvona tuulivoimalan huollossa ei tarvitse vaihtaa tai korjata osia.

Generaattorin ainoa jatkuva huoltotoimenpide on polttoaineen lisäys, johon vaikuttavat generaattorin käyttötunnit. Tankkauskerrat voidaan kuitenkin minimoida sopivan kokoisella polttoainesäiliöllä, jolloin tankkauskertoja vuodessa olisi vain muutamia kertoja. Generaattorin muut huoltotoimenpiteet, kuten öljyn ja suodattimien vaihto määräytyvät sen käyttötuntien mukaan.

Akusto on huoltovapaa ja se vaihdetaan käyttöiän umpeutuessa. Käyttöikä määräytyy todellisten purkaussyvyyksien ja niiden määrän mukaan. Ilmastointilaitteet huolletaan niille valmistajan antaman huolto-ohjelman mukaisesti.

## 5.6 Kustannukset

Nairobiin mitoitettun hybridivoimalan kokonaiskustannus muodostuu aurinko- ja tuulivoimalasta, akustosta, sekä niihin liittyvistä komponenteista ja tarvikkeista (Taulukko 8.). Aurinkovoimalan vaatimia tarvikkeita ovat aurinkopaneelilinjat, johdotukset, sekä elektroniikkakomponentit. Tuulivoimalan hintaan vaikuttavat tarvikkeet liittyvät lähinnä mastoon ja maston pystyttämiseen vaativiin komponentteihin, sekä laitteistopaneelin elektroniikkalaitteisiin. Tuulivoimalan kaikki komponentit sisältyvät sen kokonaishintaan. Nairobiin mitoitettun hybridijärjestelmän akusto koostuu kahdeksasta litiumakusta. Hybridijärjestelmään sopiva varavoimanlähde on Mitsubishin 10DMW4 8 kilowatin generaattori. Etävalvontajärjestelmän investointikustannus tulee olemaan noin 20 000 euroa (Saviva.).

**TAULUKKO 8. Mitoitetun hybridijärjestelmän kustannuksien jakautuminen ja kokonaishinta ilman arvonlisäveroa**

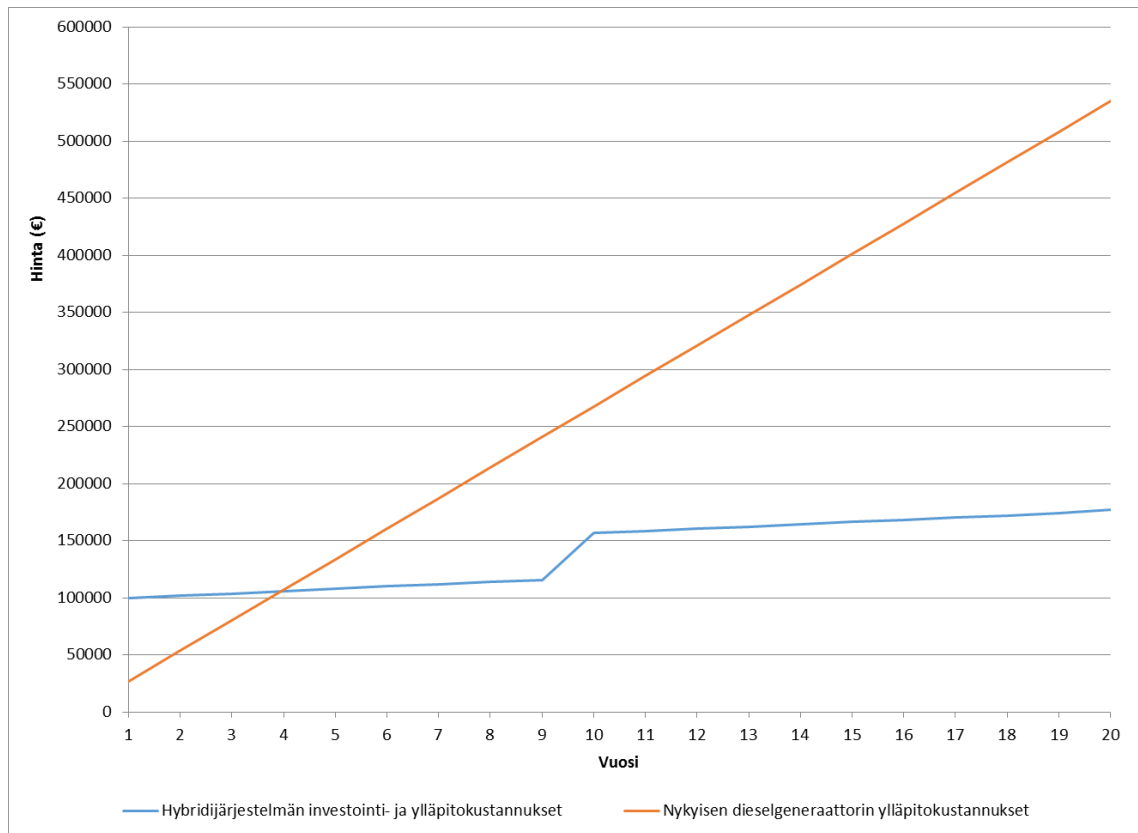
Hybridijärjestelmä		
Tuote	lkm	hinta (€)
Aurinkopaneelit ja telineet	72	17640
Lataussäädin	8	8820
Tuulivoimalat	2	26000
Akut	8	18384
Generaattori	1	7846
Tarvikkeet		1300
Etävalvonta		20000
<b>Hybridijärjestelmän kokonaishinta</b>		<b>99990</b>

Mitoitetun hybridijärjestelmän kokonaishinnaksi tulee noin 100 000 euroa. Järjestelmän hinnassa ei ole huomioitu asennuskustannuksia, toimituskuluja eikä arvonlisäveroa. Asennustilat ja jäähdytyslaitteisto hybridijärjestelmän laitteille pitää laskelmissa ottaa myös erikseen huomioon, mikäli maston luona jo oleviin tiloihin niitä ei pystytä asentamaan ja jos tilat eivät jo sisällä riittävää jäähdytysjärjestelmää.

### 5.7 Elinkaarikustannukset ja takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaika muodostuu hybridijärjestelmän investointi- ja ylläpitokustannuksista verrattuna nykyisen dieselgeneraattorin käyttökustannuksiin. Laskelmissa ei ole otettu huomioon dieselin hinnan nousua, eikä korkoprosenttia tai dollarin arvon vaihteluja. Laskennassa aloitusajankohtana on vuosi, kun nykyisen generaattorin uusimisajankohta on käsillä, jolloin mahdolliseen hybridijärjestelmään investoiminen olisi järkevin ajan-

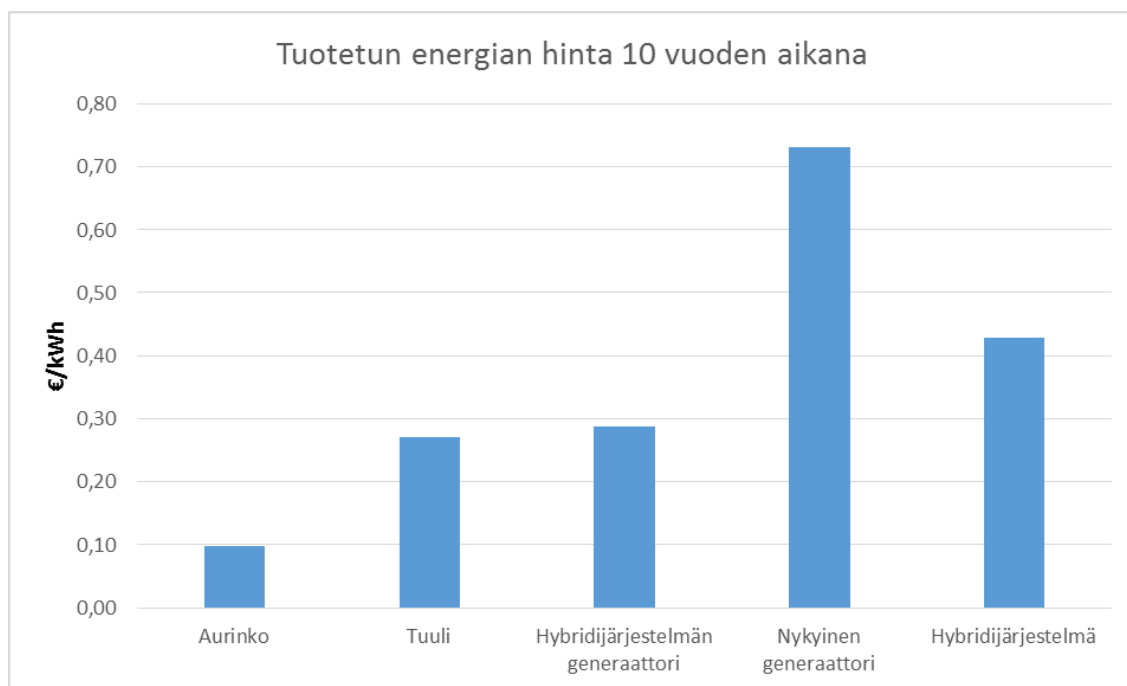
kohta (Kuva 26.). Tässä tapauksessa kummankin järjestelmän kuvaajassa on siis investointihinta.



**KUVA 26. Hybridivoimalan elinkaarikustannukset ja takaisinmaksuaika järjestelmäkustannuksilla verrattuna dieselgeneraattorin käyttöön**

Nykyisellä dieselgeneraattorilla toimivan järjestelmän käytön laskennoissa on käytetty Savivan tutkimuksen keskimääräisiä telekommunikaatiomaston dieselgeneraattorin kulutuslukuja (luku 2) sekä paikallisia dieselin litrahintoja, joita on sovellettu mitoituksessa olevaan 4 kW mastoon ja sen kulutuksiin. Hybridijärjestelmän generaattorin kulutus on taulukon 9 mukaan 3,3 litraa tunnissa. Paikallinen dieselpolttoaineen hinta on noin 1,35 dollaria litralta (Saviva), eli noin 1,15 euroa. Hybridijärjestelmän takaisinmaksuaika järjestelmäkustannuksilla on noin 4 vuotta. Arvonlisäveron ollessa 24 % ja myyntikate sekä toimituskulut huomioden takaisinmaksuajaksi muodostuu noin 6-7 vuotta.

Tarkastelemalla 10 vuoden elinkaaren aikana tuotettua energian hintaa mitoitettulla voimalalla, voidaan laskea eri laitteistoilla tuotetun kilowattitunnin hinta (Kuva 27.).



**KUVA 27. Eri laitteistoilla tuotetun kilowattitunnin hinta 10 vuoden aikana**

Tuotetun yhden kilowattitunnin hinta eri järjestelmille ja hybridijärjestelmän eri laitteistoille on laskettu jakamalla järjestelmän investointihinta (alv 0%) ja ylläpitokustannukset 10 vuoden aikana tuotetulla energiamäärällä. Kohteen huonohkojen tuuliolosuhteiden takia tuulella tuotetun energian hinta kasvaa sitä suuremmaksi, mitä enemmän tuulivoimaloita järjestelmään mitoitetaan. Kahdella pientuulivoimalalla pysytään kuitenkin generaattorilla tuotetun energianhinnan alapuolella. Auringolla tuotettu energia on muihin järjestelmiin verrattuna huomattavan edullista, mutta pitkistä öistä johtuen ei pelkästään aurinkovoiman varaan voi toteuttaa luotettavaa energiantuotantojärjestelmää. Mittoittamalla aurinkovoima heikomman kuukauden mukaan ja akuston kokoa kasvattamalla voitaisiin aurinkosähköön perustuvalla järjestelmällä tuottaa maston kuluttama energia ja ladata akusto yön varalle myös kesäkaudella, mutta talvikauden ylituotto olisi saatava myytyä järkevään hintaan esimerkiksi mahdolliseen läheisen kylän käyttöön, esimerkiksi elektroniikkalaitteiden lataukseen. Jos kaikkea ylituotettua energiaa ei pystyttäisi hyödyntämään, vaikuttaisi se järjestelmän takaisinmaksuaikaan negatiivisesti. Myös energiantuotantojärjestelmän luotettavuus heikkenisi, koska maston toiminta olisi vain aurinkovoiman varassa.

## 6 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin mahdollisuuksia korvata verkon ulkopuolisen Telecom-maston energian saanti uusiutuvilla energianlähteillä nykyisen dieselgeneraattorin sijaan. Telecom-maston toiminta mahdollistettaisiin aurinko- ja tuulivoimalla, joka nimettiin hybridijärjestelmäksi. Hybridijärjestelmän jatkuvan toiminnan takaamiseksi aurinko- ja tuulivoiman rinnalla tulisi olla myös dieselgeneraattori. Työ keskittyi aurinkovoiman tutkimiseen ja aurinkovoimalan mitoittamiseen kohdemaihin, jotka ovat Keski-Afrikan maat päiväntasaajan tuntumassa: Tansania, Uganda ja Kenia. Esimerkki kohdemaaksi valittiin Kenia.

Aurinkovoimalan mitoittamiseksi tutkittiin aluksi keskimääräisen Telecom-maston toimintaa ja sähkötehtäjäntarvetta. Keskimääräisen maston vaatima teho on 4000 W, eli sähköenergian tarve on vuodessa noin 35 000 kWh. Paikallisia olosuhteita tarkemmin tutkimalla saatiin selville aurinkoenergian potentiaali ja maston elektroniikkalaitteiden jäähdytyksentarve. Jäähdytykseen kuluva energia mukaan luettuna kokonaisenergiankulutus vuodessa on noin 36500 kWh.

Keniaassa päivän pituus on ympäri vuoden noin 12 tuntia ja päivittäinen säteilysumma on kesän  $100 \text{ kWh/m}^2$  ja talven  $150 \text{ kWh/m}^2$  välillä. Auringon reitti Keniaassa kulkee päiväntasaajan mukaisesti, joten aurinkopaneelien asennuskulmalla ei käytännön merkitystä ole, koska aurinko säteilee aina yhtä pitkään lähes kohtisuoraan paneelin pintaan vuodenaikasta riippumatta.

Telecom-maston ja jäähdytyksen yhteensä kuluttaman energian avulla voidaan mitoittaa akuston minimikapasiteetti, mutta järkevästi ylimitoittamalla akustoa voidaan vaikuttaa purkusyklin syvyyteen ja näin ollen akuston elinikään. Järkevä akustotyyppi on litium, koska se on tilaa säästävää, kevyt ja energiatehokas. 200 Ah litiumakkuja mitoitettuun akustoon tarvitaan 8 kappaletta, jolla päästään 10 vuoden elinikään akuston purkaussyvyyden ollessa 62,5 % varauskapasiteetista. Hybridivoimala energiantuotosta auringolla tuotettu osuus on 73,8 %. Se tarkoittaa sitä, että aurinkovoimalan yhteenlaskettu paneeliteho on  $17,8 \text{ kW}_p$  ja paneelipinta-ala  $121 \text{ m}^2$ .  $17,8 \text{ kW}_p$  aurinkosähköjärjestelmän vuotuinen tuotto kohdemaissa on noin 27000 kWh.



Aurinkovoimala liitetään TriStar MPPT 150 VDC lataussäätimien kautta akustoon, joka syöttää Telecom-maston päätaulua. Yhteen lataussäätimeen voi asentaa neljä sarjaan kytkettyä aurinkopaneelia kolme rinnakkain, eli yhteensä 12 paneelia per lataussäädin.

Telecom-maston jatkuvan toiminnan takaamiseksi maston toimintaa on pystyttävä seuraamaan ja ennakoimaan. Etävalvonnan avulla järjestelmän toiminnasta saadaan reaaliaikainen kokonaiskuva, jonka avulla tuleviin huolto- ja ylläpito toimenpiteisiin voidaan varautua. Mahdollisista poikkeustilanteista on saatava hälytys- tai vikatieto, jotta järjestelmän jatkuva toiminta olisi uskottavaa ja mahdollista.

Hybridijärjestelmän suurimmat edut verrattuna dieselgeneraattorilla toimivan maston toimintaan on sen matalat ylläpitokustannukset ja lähes olemattomat huoltotoimenpiteet. Dieselgeneraattorilla toimivan maston toiminnan ylläpitämiseksi on huoltotoimenpiteitä tehtävä 10-11 päivän välein ja generaattorin vaihdettava noin 3-5 vuoden välein.

Keniaan mitoitettun hybridivoimalan kokonaiskustannus muodostuu aurinko- ja tuuli-voimalasta, akustosta, sekä niihin liittyvistä komponenteista ja tarvikkeista. Lisäksi hintaan vaikuttaa generaattorin mahdollinen hankinta varavoimaksi ja etävalvontajärjestelmän investointikustannus. Näillä artikkeleilla ja järjestelmillä hybridijärjestelmän kokonaishinnaksi tulee noin 100 000 euroa. Järjestelmän hinnassa ei ole huomioitu asennuskustannuksia, toimituskuluja eikä arvonlisäveroa. Takaisinmaksuaika 100 000 euron investoinnille on noin 4 vuotta. Arvonlisäverolla 24 % ja myyntikatteella, sekä toimituskuluilla arvioitu takaisinmaksuaika olisi noin 6-7 vuotta.

Hybridijärjestelmästä muodostui toimiva kokonaisuus, jonka investointikustannus ja takaisinmaksuaika pysyivät kohtuullisina. Järjestelmän kannattavuuteen ja toimintaan vaikuttaa eniten paikalliset olosuhteet. Ihanne tilanne olisi se, että varavoimana toimivan dieselgeneraattorin käyttö saataisiin pidettyä olemattomana. Tämä lyhentäisi, jo ennestään nopeaa takaisinmaksuaikaa ja tekisi investoinnista tuottavamman.

Valmiin kokonaispaketin mahdollistamiseksi lisätutkimuksia täytyy vielä suorittaa ainakin selvittämällä paikallisten asennuspalvelujen hinta- ja taitotasoa. Lisäksi toimituskulujen muodostuminen logistisista haasteista ja lisähinnoista on tutkittava huolella ennen Afrikan markkinoille siirtymistä.

## 7 LÄHTEET

- Aurinkoenergia.fi 2015. Aurinkoenergian historia. Luettu 12.02.2015  
<http://www.aurinkoenergia.fi/Info/154/aurinkoenergian-historia>
- EEP. 2014. Electrical Engineering Portal. Luettu 19.01.2015. <http://electrical-engineering-portal.com/wp-content/uploads/hybrid-power-systems.jpg>
- Finnwind. 2015. Aurinko E- sarja yleisesite. Luettu 19.01.2015.  
<http://finnwind.fi/aurinko/Aurinko-E-sarja-yleisesite.pdf>
- Gaisma. 2015. Nairobi, Kenya – Sun path diagram. Luettu 23.2.2015  
<http://www.gaisma.com/en/location/nairobi.html>
- GeoSUN Africa. 2011. Solarmap. Luettu 19.01.2015 <http://geosun.co.za/wp-content/uploads/2012/07/SolarGIS-Solar-map-Africa-and-Middle-East-en.png>
- HSAOY. 2015. Diesel-aggregaatit Mitsubishin-moottorilla. Luettu 19.2.2015  
[http://www.hsaoy.com/aggregaatit/poweri/esitteet\\_poweri/ES\\_Poweri\\_DMW4.pdf](http://www.hsaoy.com/aggregaatit/poweri/esitteet_poweri/ES_Poweri_DMW4.pdf)
- Ilmatieteenlaitos. 2012. Säteily- ja kirkkausvaihtelut. Luettu 16.01.2015.  
<http://ilmatieteenlaitos.fi/sateily-ja-kirkkausvaihtelut> 12.01.2015.
- JRC. 2015. PV potential estimation utility. Luettu 19.01.2015  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en>
- Kompo2010. 2015. Aurinkokenno. Luettu 10.05.2015  
<https://kompo2010.wikispaces.com/Aurinkokenno>
- MORNINGSTAR. 2015. Tristar MPPT. Luettu 1.4.2015  
<http://www.morningstarcorp.com/products/tristar-mppt/>
- Ritar. 2015. RA12-200B. Luettu 11.2.2015  
<http://www.ritarpower.com/upload/pdf/2014031711464805137332.pdf>
- Saviva Research Review. Toukokuu 2013. Luettu 19.01.2015. Hybrid Energy Systems for Telecom Towers.

Solarwatt. 2015. Instruction Manuals Solarwatt Modules. Luettu 6.2.2015  
[http://www.solarwatt.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/montageanleitungen/SW\\_Montageanleitung\\_blue\\_RZ\\_ENG\\_10\\_07\\_14.pdf](http://www.solarwatt.de/fileadmin/user_upload/pdf/montageanleitungen/SW_Montageanleitung_blue_RZ_ENG_10_07_14.pdf)

SMA. 2015. SUNNY ISLAND 6.0H / 8.0H. Luettu 4.3.2015  
[http://files.sma.de/dl/17632/SI\\_OFF\\_ON\\_6H\\_8H-DEN1421W.pdf](http://files.sma.de/dl/17632/SI_OFF_ON_6H_8H-DEN1421W.pdf)

TechHydra. 2015. Science and Technology News. Luettu 6.2.2015.  
<http://techhydra.com/tech-news/science/physics/nanowires-increase-efficiency-of-solar-cells/>

Victron Energy. 2015. 12,8 Volt lithium iron phosphate batteries. Luettu 13.2.2015  
<http://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-12,8-Volt-lithium-iron-phosphate-batteries-EN.pdf>

Victron Energy. 2015. Gel and AGM Batteries. Luettu 12.2.2015  
<http://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf>

Viestintävirasto. 2015. Määräys 54. Luettu 11.02.2015  
<https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Viestintavirasto54A2012M.pdf>